

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Analýza parametrů integrity povrchu po frézování

Analysis of Surface Integrity
Parameters after Milling

Student: Jan Vicherek

Osobní číslo VIC0075

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.

Ostrava 2020

Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Vicherek**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: **Analýza parametrů integrity povrchu po frézování**
Analysis of Surface Integrity Parameters after Milling
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Rešerše k pojmu integrity povrchu.
2. Návrh experimentální činnosti frézování.
3. Provedení experimentálního testování.
4. Zhodnocení dat a diskuze výsledků.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

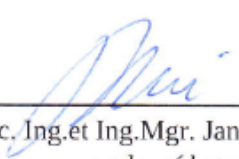
BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno : MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.
STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. *Metal cutting theory and practice*. New York : Marcel Dekker, Inc., 1997. ISBN 0-8247-9579-2.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

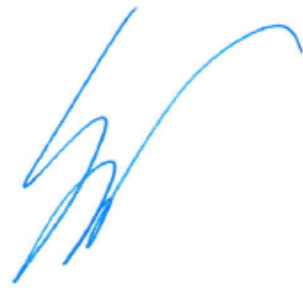
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020



doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. května 2020



.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020



Podpis studenta

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VICHEREK, Jan. *Analýza parametrů integrity povrchu po frézování: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2020, 57 s. Vedoucí práce: Petrů, J.

Bakalářská práce se zaměřuje na analýzu parametrů integrity povrchu po frézování. V práci jsou popsány jednotlivé parametry integrity povrchu včetně způsobů jejich měření. Dále jsou popsány parametry drsnosti povrchu, způsoby měření drsnosti a také způsoby teoretického výpočtu drsnosti. Experimentální část práce byla provedena na oceli 316L/1.4404. Práce obsahuje popis jednotlivých strojů a měřících přístrojů použitých při měření. Uveden je postup měření a jeho výsledky. Cílem práce bylo zhodnocení vybraných parametrů drsnosti povrchu při frézování oceli 316L/1.4404. Na závěr je uvedeno shrnutí výsledků a získaných poznatků z naměřených dat.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

VICHEREK, Jan. *Analysis of Surface Integrity Parameters after Milling: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2020, 57 p. Thesis head: Petrů, J.

The Master thesis is focused to the analysis of surface integrity parameters after milling. There are described individual parameters of surface integrity including methods of their measurement. There is also description of the surface profile and parameters of surface roughness. Methods of roughness measurement are presented as well as methods of theoretical roughness calculation. The experimental part was made using 316L/1.4404 steel. The thesis includes a description of individual machines and measuring appliances used in the measurement. The measurement steps and its results are included as well. The result is evaluation of selected parameters of surface roughness during milling 316L/1.4404 steel. The conclusion includes summary of the outcomes and gathered findings of measured data.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	7
Úvod	8
1 Integrita povrchu.....	11
1.1 Integrita povrchu v současnosti.....	12
1.2 Faktory integrity povrchu po obrábění.....	12
1.3 Přesnost tvaru a rozměru	13
1.4 Mikrostruktura povrchu.....	14
1.5 Deformační zpevnění	14
1.6 Zbytková napětí	16
1.6.1 Druhy zbytkových napětí.....	16
1.6.2 Dělení zbytkových napětí	17
1.6.3 Metody měření zbytkových napětí	18
1.6.4 Vliv zbytkových napětí na integritu povrchu	20
1.7 Mikrogeometrie povrchu.....	20
1.7.1 Parametry mikrogeometrie povrchu.....	21
1.7.2 Výškové parametry drsnosti.....	23
1.7.3 Délkové parametry drsnosti	25
1.7.4 Tvarové parametry drsnosti	25
1.7.5 Metody měření drsnosti.....	25
1.7.6 Výpočet teoretické drsnosti	27
1.8 Vliv řezných podmínek na integritu povrchu při frézování	29
1.8.1 Drsnost povrchu při čelním frézování	29
1.8.2 Drsnost povrchu při čelním frézování oceli 316L/1.4404	32
1.8.3 Drsnost povrchu při frézování oceli 316L/1.4404 za použití chlazení....	33
2 Návrh experimentální činnosti frézování	35
2.1 Zkoušený materiál.....	35

2.2	Použitý stroj pro přípravu vzorku	37
2.3	Použitý nástroj a břitové destičky	38
2.4	Použité měřicí přístroje	40
2.5	Měřené parametry drsnosti povrchu	41
3	Vyhodnocení hodnot parametrů drsnosti povrchu	42
3.1	Naměřené hodnoty Ra a Rz	42
3.2	Testování hodnot na výskyt hrubých chyb	43
3.3	Výpočet nejistot měření	43
3.4	Vyhodnocení naměřených hodnot parametrů Ra a Rz	46
4	Závěr	52
5	Použitá literatura	54

Seznam použitých značek a symbolů:

Značka	Popis	Jednotky
APMXEFW	Maximální hloubka řezu	[mm]
BS	Délka hladicího břitu	[mm]
CICT	Počet řezných prvků	[–]
DC	Řezný průměr frézy	[mm]
DCON	Spojovací průměr	[mm]
F	Síla	[N]
f_z	Posuv na zub	[mm]
k	Součinitel pro rovnoměrné rozdělení dle zákona rozdělení	[–]
k_u	Koeficient rozšíření	[–]
LF	Funkční délka	[mm]
LE	Účinná délka břitu	[mm]
lr	Základní délka	[mm]
n	Počet měření	[–]
Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu	[μm]
Rc	Průměrná výška profilu	[μm]
RE	Poloměr rohu	[mm]
Rku	Špičatost posuzovaného profilu	[μm]
Rp	Největší výška výstupku profilu	[μm]
Rq	Průměrná kvadratická úchylka profilu	[μm]
Rsk	Šikmost posuzovaného profilu	[μm]
RSm	Průměrná vzdálenost prvků profilu	[μm]
Rt	Celková výška profilu	[μm]
Rv	Největší hloubka prohlubně profilu	[μm]
Rz	Největší výška profilu	[μm]
RΔq	Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu	[μm]
r_ϵ	Poloměr zaoblení hrotu nástroje	[mm]
S	Tloušťka VBD	[mm]
$s(\bar{x})$	Směrodatná odchylka	[μm]
u_A	Nejistota typu A	[μm]
u_B	Nejistota typu B	[μm]
u_{B1}	Nejistota vlivu opěrné patky snímacího hrotu	[μm]
u_{B2}	Nejistota měřicího přístroje	[μm]

U_c	Rozšířená kombinovaná nejistota	[μm]
u_c	Kombinovaná standartní nejistota	[μm]
VBD	Vyměnitelná břitová destička	[–]
v_c	Řezná rychlost	[$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]
W1	Šířka břitové destičky	[mm]
\bar{x}	Průměrná hodnota	[μm]
x_i	Naměřené hodnoty	[μm]
Z_p	Výška nejvyššího výstupku profilu v rozsahu základní délky	[μm]
$Z_{p\max}$	Největší výška výstupku profilu v základní délce	[μm]
Z_v	Hloubka nejnižší prohlubně v rozsahu základní délky	[μm]
$Z_{v\max}$	Největší hloubka prohlubně profilu v základní délce	[μm]
$Z(x)$	Hodnoty pořadnic v rozsahu základní délky	[μm]
$z_{1\max}$	Hodnota určena z přesnosti přístroje	[–]
λ_c	Filtr oddělující profil drsnosti od dlouhovlnných složek	[mm]
λ_f	Filtr oddělující profil vlnitosti od dlouhovlnných složek	[mm]
λ_s	Filtr oddělující základní profil od krátkovlnných složek	[mm]

Úvod

Tato práce se zabývá studiem technologie frézování a jejím vlivu na výsledné parametry integrity povrchu po obrábění při použití progresivních metod frézování. Technologie frézování je významným odvětvím ve strojírenské výrobě, jelikož umožňuje za použití různých technologických procesů vytvoření velkého množství různých druhů výrobků požadovaných parametrů, včetně požadované kvality povrchu.

V současné době zesiluje snaha výrobních podniků o rozvoj výrobních systémů s cílem zvyšování pružnosti, efektivity a produktivity výroby. Tento trend se objevuje u jednoduchých obráběcích strojů, ale i u složitých obráběcích center. Můžeme vypočítat významný pokrok, co se týče využití moderních řídicích prvků stroje k řízení drah, rychlostí, pohybů nástroje, polohy obrobku nebo automatickou výměnu nástrojů.

Jednou z cest ke zvýšení produktivity je zefektivnění samotného řezného procesu. Cílem je v co nejkratším čase odebrat co největší množství materiálu z obrobku při zachování parametrů požadovaných zákazníkem při přijatelných výrobních nákladech. Je třeba přitom vzít v úvahu vliv použité technologie na kvalitu povrchu. Vzniká také celá řada dalších problémů, co se týče například výkonu a tuhosti stroje. Dalšími omezujícími faktory může být chování materiálu při řezném procesu nebo řezivost nástroje. I přes pokrok v oblasti nástrojů a obráběcích strojů musíme vzít v úvahu skutečnost, že množství energie převedené na břit ovlivní vlastnosti obrobené povrchové vrstvy materiálu. Jakým způsobem a jak moc intenzivně zaleží na použitém nástroji, obráběném materiálu a celé řadě dalších faktorů.

Integrita povrchu má velké množství dílčích parametrů, které mohou být změřeny a vyhodnoceny. Kvalita povrchové vrstvy je důležitá pro spolehlivost a dlouhou životnost součástí v provozu. Bakalářská práce se zabývá dílčími parametry integrity povrchu s primárním zaměřením na parametry drsnosti povrchu. Rozebírá její profilové a plošné parametry. V další části blíže popisuje směry používané pro progresivní obrábění.

V praktické části bylo provedeno v laboratoři VŠB-TUO měření obrobeného povrchu přenosným přístrojem na měření drsnosti HOMMEL-ETAMIC W5. Výsledky byly naměřeny při různých řezných podmínkách a výsledky v závislosti na těchto podmínkách vyhodnoceny. Cílem celé práce bylo zpracovat oblast problematiky integrity povrchu a zhodnotit naměřené výsledky drsnosti v závislosti na řezných podmínkách.

1 Integrita povrchu

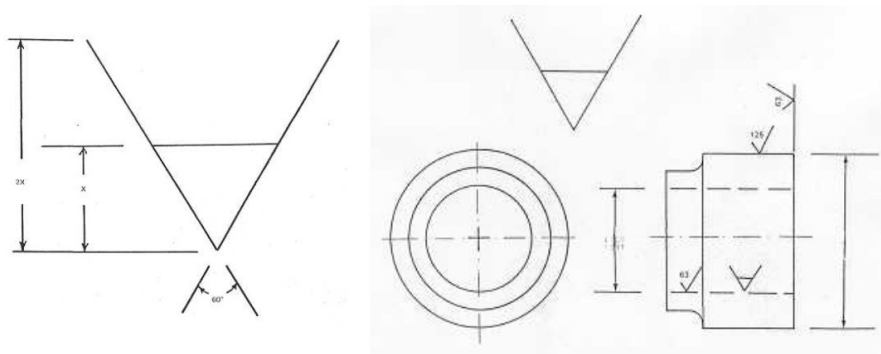
Jedná se o pojem, který byl poprvé představen Dr. Michaellem Fieldem a Johnem F. Kahlesem na symposiu Metcut Research Associates Inc. v roce 1964. Předmětem tohoto symposia bylo sledování zbytkových napětí po broušení. Došlo zde k vytvoření základu pro širší sledování souvislostí mezi technologií řezného procesu a výslednými vlastnostmi povrchu. ^[1]

Při výrobě je velmi důležitá znalost mechanismu vytváření nového povrchu výrobku. V povrchové vrstvě součásti nastávají změny různého charakteru. Všechny tyto změny, lze posoudit jako změny kvality. Ty se poté mohou využít pro hodnocení integrity dokončené plochy pomocí vztahu mezi změnou kvality a funkcí dokončené plochy. ^[2]

Integrita povrchu tedy funguje jako odraz podmínek, za kterých funkční plocha vzniká. Posuzuje důsledky působení technologických operací na kvalitu obrobené plochy a vytváří jejich vztahy k funkčním požadavkům na obrobenou funkční plochu. ^[2]

Je tedy potřeba dávat do souvislosti technologické metody a podmínky technologických operací s požadavky na kvalitu, spolehlivost a životnost součástí či zařízení, na což bylo poukázáno počátkem 70. let, kdy byla pozornost na problematiku integrity povrchu zaměřena především u zpracovávání vysokopevnostních ocelí. ^[2]

Způsob, kterým by šlo komplexně vyhodnotit obrobenou plochu a určit její integritu zatím není znám. Důvodem je obsáhlost samotného pojmu a množství parametrů povrchu v něm obsažených. Velké množství údajů o obrobené ploše je možné běžně zjišťovat a měřit, ale nejspolehlivější zkouškou integrity povrchu je v současné době samotný provoz. V roce 1990 byla vydána upravená verze normy ANSI B211.1 1986, v níž byla zavedena výkresová značka integrity povrchu. Tato značka však není používána z toho důvodu, že neexistuje číselná hodnota pro integritu povrchu. ^{[1] [2]}



Obrázek 1 – Výkresová značka integrity povrchu ^[1]

1.1 Integrita povrchu v současnosti

V současné době se vyvíjí a vyrábí velké množství stále více komplikovaných součástí a zařízení. Zároveň však dochází k současnému zvyšování požadavků na jejich životnost, spolehlivost a kvalitu.

Je zaznamenáván velký pokrok, co se týče oblasti konstrukce a materiálu nástrojů. Jde o velké množství druhů vyměnitelných břitových destiček, břitových bloků a jejich široké uplatnění ve výrobě. V odvětví nástrojových materiálů jsou k dispozici různé druhy materiálů s různými vlastnostmi. V nabídce nalezneme materiály od rychlořezných ocelí a slinutých karbidů, přes řeznou keramiku, až po syntetický diamant a kubický nitrid bóru. Současně se ale ve výrobě zvyšuje zastoupení těžkoobrobitelných materiálů. [2]

Řezné materiály a výrobní technika se z hlediska vývoje posuzují především z pohledu vlivu na produktivitu práce. Když však budeme uvažovat o plném využití řezivosti nových nástrojových materiálů, které mohou být často až několikanásobně vyšší než u běžně konvenčně používaných, je třeba se zaměřit na proces vytváření nového obrobeného povrchu. A to v posouzení jak a v jaké míře velké množství energie převedené na břit nástroje ovlivní vlastnosti a kvalitu obrobeného povrchu, tedy jeho integritu. [2]

1.2 Faktory integrity povrchu po obrábění

Pojem integrita povrchu v sobě zahrnuje velké množství dílčích parametrů, pomocí kterých lze prozkoumat hlubší vlastnosti v povrchových a podpovrchových vrstvách. Výběr konkrétních parametrů pro hodnocení povrchu závisí především na tom, jaké požadavky budou kladeny na vyrobenou součást v provozu. Před hodnocením těchto parametrů je tedy potřeba velmi podrobně znát provozní podmínky a z nich vycházet při hodnocení integrity povrchu vyrobené součásti. Mezi základní charakteristiky, kterými můžeme integritu povrchu po obrábění hodnotit jsou:

- přesnost tvaru a rozměru,
- mikrostruktura povrchu,
- vlastnosti povrchové a podpovrchové vrstvy (tvrdost, mikrotvrdost, zbytková napětí, deformační zpevnění),
- mikrogeometrie povrchu. [2] [3] [4]

1.3 Přesnost tvaru a rozměru

Přesností tvaru a rozměru je myšlena míra shodnosti rozměru obrobene součásti s rozměry uvedenými ve výkresové dokumentaci. Přesnost součástí je definována pomocí tolerancí rozměrů a odchylek tvaru a vzájemné polohy. ^[5]

Odchytky způsobené nepřesností výrobního stroje jsou závislé na přesnosti práce stroje. Tato nepřesnost může být způsobena nepřesností jeho součástek, házením vřetene stroje, vibracemi nebo špatným vyvážením součástí stroje či přípravku. ^[5]

Existují také odchytky způsobené zatížením stroje, kdy dochází k pružné deformaci technologické soustavy působením řezných sil. Tyto deformace se objevují zpravidla ve stykových spojeních stroje, přípravků a nástrojů. Velikost těchto deformací a tím pádem i odchylek závisí na schopnosti jednotlivých částí stroje odolávat těmto silám. Této schopnosti říkáme tuhost. ^[5]

Mezi další nepřesnosti můžeme zařadit odchytky způsobené změnou teploty, a to jak teploty okolí, tak změnou teploty způsobené ohřevem obrobku teplem, které vzniká při procesu obrábění. Dále také na obrobek působí upínací síly, které deformují nejen obrobek, ale i povrch součástí. K výraznému projevu těchto sil dochází například u upínání trubek, nebo tenkostěnných pouzder. ^[5]

Přesnost je tedy ovlivněna především vlastní přesností stroje, tuhostí systému stroj-nástroj-obrobek a dalšími faktory, které působí na proces obrábění. Mezi ty patří zejména řezné podmínky, obráběný materiál, geometrie břitu nástroje a řezné prostředí. U hrubování se vyžaduje, aby za jednotku času byl odebrán co největší objem materiálu. U obrábění na čisto je potřeba dodržet předepsané parametry obrobene plochy. ^{[2] [4]}

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty drsnosti povrchu a přesnosti rozměrů IT, kterých je možno dosáhnout uvedenými metodami obrábění.

Tabulka 1 – Hodnoty drsnosti povrchu a přesnosti rozměrů ^[6]

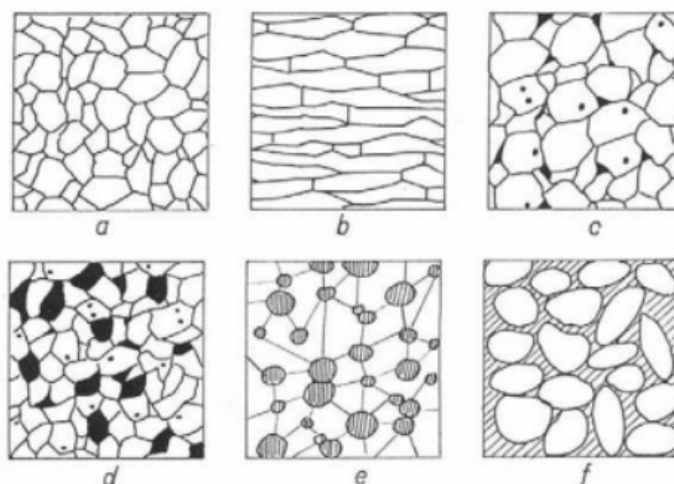
Způsob obrábění	Drsnost povrchu Ra [μm]	Přesnost rozměrů IT
Hrubování	> 6,3	≥ 12
Obrábění načisto	1,6 – 6,3	9 – 11
Jemné obrábění	0,2 – 1,6	5 – 8
Speciální dokončovací obrábění	< 0,2	< 5

1.4 Mikrostruktura povrchu

Mikrostruktura je definována jako vlastnost polykrystalického materiálu. V materiálech se vyskytují zrna, která jsou viditelná pouhým okem, ale také zrna mikroskopických rozměrů (nanomateriály). Uspořádání těchto zrn je obecně náhodné. V případě, že mají zrna sklon se orientovat v určitém směru, mluvíme o tzv. textuře materiálu. Například u tažení drátu nebo válcování plechu se vytváří usměrněná struktura, kdy se zrna naklání do roviny deformace, v tomto případě hovoříme o deformační textuře.^[7]

Samotná mikrostruktura nemusí být složena pouze z kompaktní pevné fáze, ale mohou se v ní vyskytovat různě velké póry. Pórovitost je také jedna z důležitých charakteristik materiálu ovlivňující jeho chemické a fyzikální vlastnosti.^[7]

Mikrostruktura povrchu je přímo ovlivněna procesem řezání. Největší vliv na mikrostrukturu povrchu má řezná rychlost, řezný materiál, tvar nástroje a jeho opotřebení.^[7]



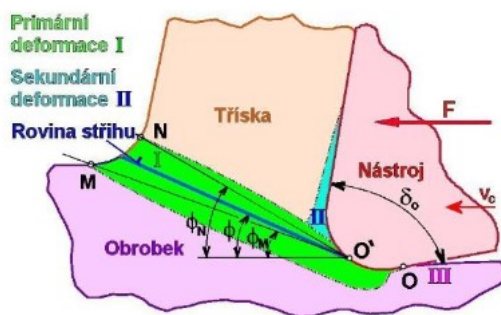
Obrázek 2 – Příklady typů mikrostruktur: a) mikrostruktura s různě velkými zrna, b) mikrostruktura s texturou, c) mikrostruktura s malými póry, d) mikrostruktura s póry velikosti zrna, e) mikrostruktura o dvou fázích, f) mikrostruktura, kde nemají krystalická zrna těsnou hranici^[7]

1.5 Deformační zpevnění

Vlivem řezného procesu se mění mechanické vlastnosti v povrchové vrstvě obráběné plochy. K ovlivnění dochází fyzikálními a chemickými procesy. Ty mají za následek výskyt deformačního zpevnění a zbytkových napětí.^[8]

Příčinou deformačního zpevnění je to, že oblast primárních plastických deformací dosahuje do úrovně, která je pod úrovní budoucího povrchu. Plastická deformace se

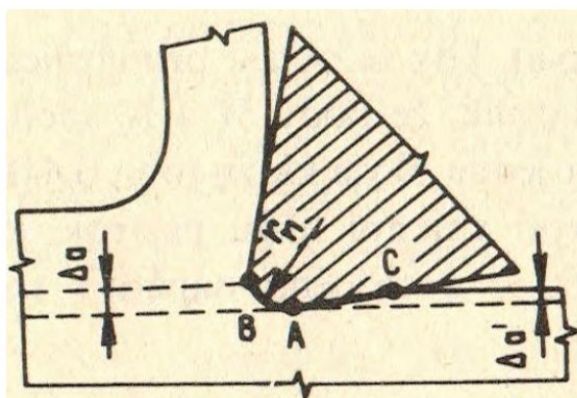
dělí do tří oblastí, a to do oblasti primární plastické deformace, oblasti stříhu nacházející se v povrchové vrstvě obrobené plochy a oblasti sekundární plastické deformace. [8]



Obrázek 3 – Oblasti deformací [8]

Během obrábění tedy nedochází pouze k deformacím v odebírané vrstvě, ale i v obrobené ploše a povrchové vrstvě třísky. Hlavní příčinou je zaoblení břitu. Síla, která působí mezi hřbetem nástroje a obrobenou plochou vyvolává napětí a deformace na povrchu obrobené plochy. Vzhledem k teplotám, během kterých deformace probíhá, se materiál neroztaví, a to způsobí trvalý účinek zpevnění povrchové vrstvy. Teploty, při kterých dochází k plastickým deformacím jsou totiž podstatně nižší než rekrytalizační teplota. [9]

Nově vytvořená zpevněná vrstva má obecně lepší mechanické vlastnosti, jako je pevnost nebo tvrdost oproti původnímu obráběnému materiálu. K tomuto efektu zpevnění dochází především u materiálu s dobrými deformačními schopnostmi, tedy hlavně u ocelí a slitin hliníku. U křehkých kovů naopak dochází k menšímu zpevnění. Jedny z faktorů ovlivňující hloubku a intenzitu zpevnění jsou například řezné podmínky (hloubka třísky, řezná rychlost) a také geometrické parametry nástroje. Zpevněná vrstva také zvyšuje odolnost obrobeného povrchu proti opotřebení, korozi a je soudržná se základním materiálem. [4] [9]



Obrázek 2 – Zpevnění povrchové vrstvy: r_n – poloměr ostří, BAC – styčná plocha, $\Delta\alpha$ – oblast plastické deformace (zpevňování povrchové vrstvy), $\Delta\alpha'$ – zpevněná povrchová vrstva [9]

Změna zmíněných mechanických vlastností má vliv na výslednou kvalitu, tribologii a únavové vlastnosti součásti. Posuzuje se nejčastěji podle změn tvrdosti. Jelikož jde o velmi tenké vrstvy materiálu, nejlépe se tyto změny hodnotí dle výsledků ze zkoušek mikrotvrdosti. ^[10]

1.6 Zbytková napětí

Působením vnějších sil při řezném procesu dochází ke vzniku deformací materiálu. Ty jsou způsobeny vzájemným působením vnitřních a vnějších sil, které se snaží deformacím zabránit. Velikost vnitřních sil je závislá na vzájemném silovém působení částic materiálu v příslušné krystalové mřížce materiálu. Chování materiálu z pohledu elastických deformací je důležitým parametrem pro oblast konstrukce a pevnostních výpočtů. Chování z pohledu plastických deformací je důležité pro oblast technologie, kde dochází k cílené změně tvaru a rozměrů vyrobené součásti. Stav napjatosti, ve kterém se součást nachází po odstranění vnějších sil, je možno charakterizovat za pomoci zbytkových napětí v materiálu. ^[11]

Zbytková napětí vznikají pod obrobeným povrchem pouze v případě, že v povrchové vrstvě dochází k plastickým deformacím. Mohou být buď tahové (působí směrem ven z materiálu), anebo tlakové (působí směrem do materiálu). Jejich velikost souvisí přímo s konkrétní použitou technologií ve výrobním procesu. Působení zbytkových napětí na povrchu součástí má významný vliv na kvalitu obrobeného povrchu, vznik trhlin, náchylnost ke korozi a celkovou životnost součásti. ^[11]

1.6.1 Druhy zbytkových napětí

Zbytková napětí způsobená nerovnoměrnou plastickou deformací:

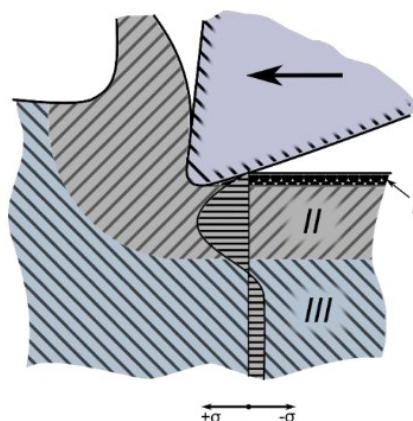
Příčinou těchto napětí je silový účinek nástroje. Objevují se u technologických procesů, u kterých dochází k plastickému přetvoření povrchové vrstvy. Jádro materiálu je však deformováno pouze pružně. Většinou nedochází k ovlivnění materiálu teplem. Obráběný povrch je tedy deformován jenom plasticky tlakem nástroje. Pružně deformované vrstvy mají snahu vrátit se po ukončení řezného procesu zpět do původní polohy. Tím působí na povrchovou, plasticky deformovanou vrstvu a vytváří zbytková napětí ve formě tlaku. ^[11]

Zbytková napětí způsobená nerovnoměrným teplotním ovlivněním:

Tyto napětí mohou vznikat při ohřevu nebo ochlazování obráběné součásti. Vlivem teploty se totiž mění modul pružnosti. Během chladnutí se povrchová vrstva materiálu smršťuje, dochází k plastickým deformacím a ke vzniku tahových napětí uvnitř povrchové vrstvy. Napětí jsou větší než vnitřní tlaková napětí vznikající při ohřevu součásti. To je způsobeno tím, že modul pružností ochlazené vrstvy je větší než modul pružnosti této vrstvy během ohřátí. Rozdíl mezi vnitřním napětím vrstvy v ohřátém a ochlazeném stavu přímo ovlivňuje velikost zbytkových napětí na povrchu součásti. [11]

Zbytková napětí způsobená nerovnoměrnou fázovou transformací:

Jedná se o zbytková napětí, která jsou obvyklá pro všechny technologické operace typu soustružení, frézování, protahování a další podobné. Vznikají díky řeznému klínu nástroje, který není ideálně ostrý. Při řezném procesu klín neodřeže celou hloubku záběru, ale určitou část zatlačí do obrobeného povrchu součásti. Dochází k plastickým deformacím v důsledku poklesu hustoty obrobeného povrchu a zvýšení měrného řezného objemu. Vznikají tak povrchová tlaková zbytková napětí. [11]



Obrázek 3 – Vznik zbytkových napětí vlivem nástroje: I – oblast tlakových napětí způsobených třením hřbetu řezného klínu a obráběné plochy, II – oblast tahových napětí způsobených plastickým stlačením materiálu, III – neovlivněná oblast s vyrovnaným napětím z oblasti I a II [11]

1.6.2 Dělení zbytkových napětí

Zbytková napětí můžeme rozdělit na napětí typu makro a typu mikro. Oba typy mohou být na povrchu součásti přítomny současně. Makro zbytková napětí jsou často označována jako napětí I. druhu a vyskytují se napříč celou součástí. Mikro zbytková napětí vyplývají z rozdílu mikrostruktury materiálu a jsou označována jako zbytková napětí II. nebo III. druhu. Jsou důsledkem přítomnosti různých fází nebo složek

v materiálu. Zbytková napětí II. druhu se formují na úrovni zrnitosti. Zbytková napětí III. druhu se vytváří na atomové úrovni. ^[12]

Zbytková napětí I. druhu:

Vyskytují se v celém objemu součásti, nebo v její části. Mají makroskopický charakter a patří k nim zbytková napětí v rozsáhlé, nekonečně tenké oblasti. Vznikají v důsledku technologických procesů jako je tváření, obrábění nebo lití. ^{[11] [13]}

Zbytková napětí II. druhu:

Zasahují do objemu několika krystalových zrn. Podmínka pro vznik těchto napětí je anizotropie zrna. V polykrystalických kovech jsou homogenní pouze v malých oblastech jednotlivých zrn. Při narušení jejich rovnováhy nemusí dojít ke změnám makrogeometrie součásti. ^{[11] [13]}

Zbytková napětí III. druhu:

Tyto napětí se mohou vyskytnout pouze v objemu několika vzdáleností atomů. V rovnováze mohou být jen v dostatečně velké části zrna. Porušením této rovnováhy nikdy nedojde k makrogeometrie součásti. Vznikají kvůli poruchám struktury krystalové mřížky – bodových, čarových, plošných apod. ^{[11] [13]}

1.6.3 Metody měření zbytkových napětí

Existuje velké množství různých metod pro měření zbytkových napětí založených na různých principech. Podle míry narušení celistvosti měřené součásti je můžeme rozdělit na tři základní skupiny:

- destruktivní – dochází k poškození a znehodnocení zkoušené součásti,
- polodestruktivní – dochází k částečnému znehodnocení zkoušené součásti, avšak nedochází k ovlivnění její funkčnosti, případně lze poškození odstranit,
- nedestruktivní – nedochází k zásahu do povrchu součásti. ^[11]

Podle zvoleného principu nebo jevu, na kterém je metoda založena, dělíme metody měření na mechanické, fyzikální a nepřímé. ^[11]

Mechanické metody:

Většina těchto metod je založena na deformacích, které vzniknou při porušení vnitřní rovnováhy napětí. Tyto deformace vznikají odstraněním části vrstvy materiálu součásti. Po naměření deformací se stanovuje napjatost v měřeném místě pomocí vztahů mezi napětím a deformací. Nevýhodou tohoto způsobu měření je znehodnocení součásti, schopnost určení napětí pouze I. druhu a také možnost vyvolání přidavných napětí. Ty mohou zapříčinit zkreslení výsledku měření. [3]

Fyzikální metody:

Nejčastěji používaná nedestruktivní fyzikální metoda je rentgenová difrakce. Princip této metody je založen na určení zbytkového napětí materiálu měřením mřížkové konstanty v krystalické struktuře. Tato metoda otevírá možnost zjištění zbytkových napětí ze změn vzdáleností atomových rovin krystalů. Tyto vzdálenosti se mění v důsledku plastické deformace, a jsou ovlivněny všemi druhy napjatosti. Na rozdíl od mechanických metod jsme tedy touto metodou schopni zjistit i napětí II. a III. druhu. Nevýhodou je možnost měření mřížkové vzdálenosti pouze v tenké povrchové vrstvě do hloubky několika mikrometrů. [3]

Metody	Tvar součásti	Způsob měření	
Mechanické	plochý tvar	deformace pásků	změna délky
			změna zakřivení
		vrtání děr	válcová díra
			mezikružší
	rotační tvar	změna rozměru válce	odstranění povrchové vrstvy
		trubka	rozříznutí trubky
			odstranění povrchové vrstvy
			odstranění vnitřní vrstvy
		kroužek	rozříznutí
			změna křivosti
			podélné pásy z kroužků
	obecný tvar	metoda sítí	deformace sítě
		křehké laky	vznik trhlin
		křehké modely	vznik trhlin
Fyzikální RTG	obecný tvar	difrakce	vzdálenost meziatomových rovin
Fyzikální ultrazvuk	obecný tvar	šíření vln	změna rychlosti
			odraz vln
			vnitřní tlumení
Elektrické	obecný tvar	změna proudu	změna potenciálu procházejícího proudu
			změna velikosti vířivých proudů
			změna indukčního toku
Magnetické	obecný tvar	změny magnetismu	magnetická indukce
			zbytkový magnetismus
Akustické	obecný tvar	prozvočitelnost	četnost akustických emisí
Chemické	obecný tvar	difuze vodíku	trhliny na povrchu
		změna chemické aktivity	změna struktury

Obrázek 4 – Podrobné rozdělení metod měření zbytkových napětí [3]

1.6.4 Vliv zbytkových napětí na integritu povrchu

Vlivy, které mají dopad na integritu povrchu včetně zbytkových napětí se v současné době zkoumají odděleně. Na druhou stranu však existuje mezi těmito vlivy zcela jistě souvislost, jelikož na povrch působí všechny současně. Nelze tedy jednoznačně říci, že zvýšená hladina zbytkových napětí nepovede k porušení celé součásti, nebo zapříčiní porušení povrchové vrstvy. Je to dáno také tím, že i při porovnání dvou identických součástí s například rozdílně tepelně zpracovaným materiálem nelze předpokládat porušení povrchu součásti se stejnou pravděpodobností. ^[13]

Pokud jsou zbytková napětí tlaková, vedou zpravidla k uzavírání povrchových defektů a tím zvyšují užité vlastnosti. V podpovrchových vrstvách se však mohou vyskytovat napětí tahová a ty mohou způsobit přesunutí únavového iniciačního centra pod povrch a další negativní vlivy. U tahových napětí také hrozí zvýšení pravděpodobnosti korozního napadení. Proto je důležité sledovat nejen výskyt zbytkových napětí, ale i jejich průběh. ^[13]

Při posuzování integrity povrchu je tedy třeba se soustředit i na ostatní vlastnosti součásti, ne pouze na zbytková napětí. Tím vzniká problém s určením dopadu zjištěných hodnot zbytkových napětí na kvalitu povrchu součásti. Dalším problémem je absence jakéhokoli systému, který by umožnil mezi sebou porovnat a kvantifikovat vliv zbytkových napětí a ostatních vlastností povrchu, které ovlivňují jeho výslednou integritu. ^[13]

1.7 Mikrogeometrie povrchu

Geometrie povrchu se dělí podle velikosti odchylek od ideálního povrchu na makrogeometrii a mikrogeometrii. Zatímco pod makrogeometrii spadají odchylky tvaru, mikrogeometrie specifikuje povrch z pohledu drsnosti a jejího rozdělení. ^[14]

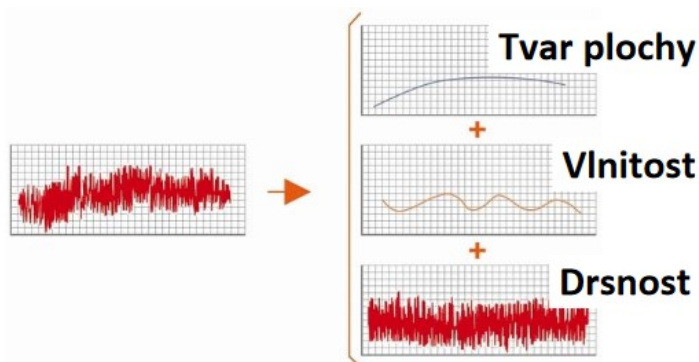
Pro vyhodnocení mikrogeometrie jak z kvalitativního, tak z kvantitativního hlediska, se využívají zejména výškové charakteristiky drsnosti povrchu, případně tvarové charakteristiky profilu. Mikrogeometrie je rozdělena podle rozteče nerovností na jednotlivé složky. Drsnost povrchu tvoří složka s nejmenší roztečí. Složka s největší roztečí a složka vlnitosti je základní profil. ^[14]

Drsnost povrchu lze definovat jako výšku nerovnosti reálné plochy vzhledem k ideálně dokonalé ploše. Drsnost součásti je do jisté míry závislá na přesnosti chodu součástí stroje. Mezi vlastnosti ovlivňující výslednou drsnost patří například doba

záběru, přestup tepla, odolnost proti opotřebení, ztráty třením, únavová pevnost, elektrická vodivost a další vlastnosti. Pro předpověď funkčního chování povrchu při daném zatížení nebo jeho klasifikaci potřebujeme přesný a úplný popis jeho mikrogeometrie. Samotnou drsnost povrchu je možné chápat jako mikronerovnost. [11]

1.7.1 Parametry mikrogeometrie povrchu

Povrch můžeme rozdělit do tří základních složek:

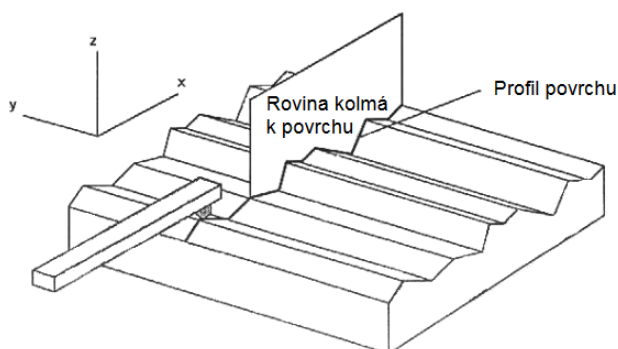


Obrázek 5 – Komponenty obecného povrchu [15]

Dělení povrchu:

- skutečný povrch – povrch oddělující těleso od okolního prostředí,
- geometrický povrch – ideální povrch určen technickou dokumentací,
- základní povrch – povrch sloužící k vyhodnocení parametrů drsnosti. [11]

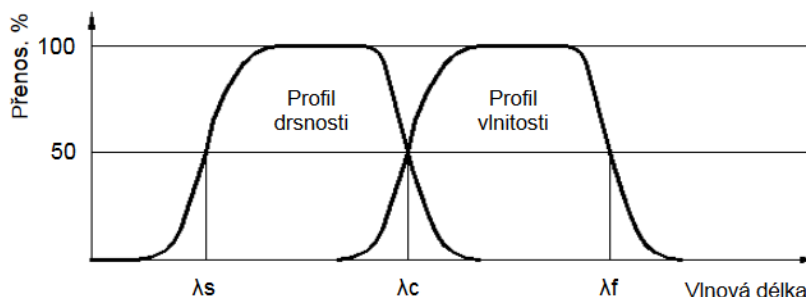
Struktura povrchu je posuzována tak, že pomocí roviny kolmé na povrch je získán profil povrchu. Jednotlivé složky je možné od sebe oddělit tzv. filtrací. Filtrace je vyjmutí nežádoucích složek ze zkoumaného profilu povrchu. Tento proces se provádí pomocí různých druhů filtrů. Tyto filtry mají různé vlnové délky pro oddělení jednotlivých složek profilu povrchu. [16] [17]



Obrázek 6 – Profil povrchu [17]

Dělení filtrů profilu:

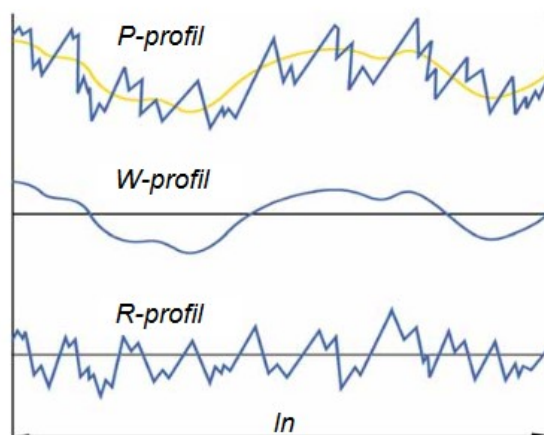
- filtr λ_s – udává rozhraní mezi krátkovlnnými složkami a drsností,
- filtr λ_c – udává rozhraní mezi složkami vlnitosti a drsnosti,
- filtr λ_f – udává rozhraní mezi vlnitostí a dlouhovlnnými složkami. [16]



Obrázek 7 – Filtrování v oblasti frekvence [17]

Struktura povrchu je rozdělena podle rozteče příslušných nerovností. Norma ČSN EN ISO 4287 definuje příslušné geometrické parametry.

- P – základní profil – po použití krátkovlnného filtru λ_s .
- R – profil drsnosti – odvozený ze základního profilu po použití filtru λ_c .
- W – profil vlnitosti – po použití filtru λ_f a λ_c na základní profil. [11] [16]



Obrázek 8 – Profily drsnosti a vlnitosti odvozené od základního profilu [17]

Při měření drsnosti se používají dvě délky. Správný výběr základní a vyhodnocované délky má vliv na objektivnost a správnost výsledků měření. Základní délka l_r se rovná vyhodnocované délce. Používá se na oddělení nerovností, podle kterých charakterizujeme drsnost povrchu. Vyhodnocovaná délka l_n může obsahovat jednu nebo více základních délek. Nejčastěji se k vyhodnocení hodnot parametrů drsnosti

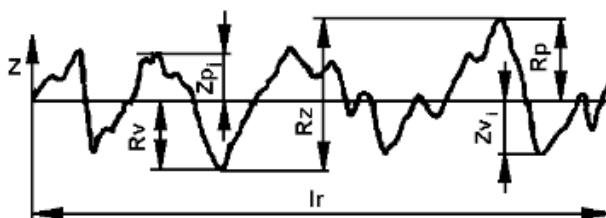
povrchu užívá pětinasobek základní délky. Základní délka musí mít dostatečnou velikost pro měření parametrů, ale nesmí zahrnovat nepodstatné detaily a vlivy vlnitosti. ^{[11] [17]}



Obrázek 9 – Schéma délek používaných při měření drsnosti ^[17]

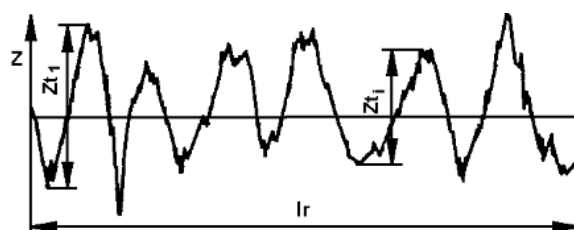
1.7.2 Výškové parametry drsnosti

- **R_p** – největší výška výstupku profilu,
- **R_v** – největší hloubka prohlubně profilu,
- **R_z** – největší výška profilu,
- **R_t** – celková výška profilu,
- **Z_p** – výška výstupku profilu,
- **Z_v** – výška prohlubně profilu. ^[16]



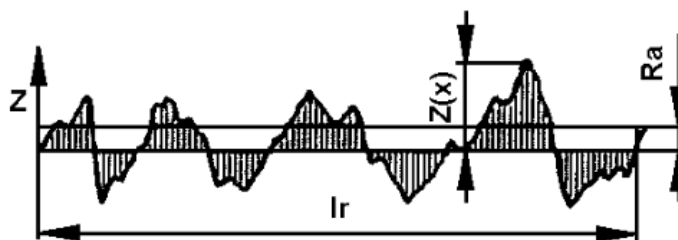
Obrázek 10 – Schéma parametrů R_p , R_v , R_z ^[16]

Průměrná výška profilu R_c – hodnota průměru výšek Z_t prvků v profilu v rozsahu základní délky l_r . ^[16]



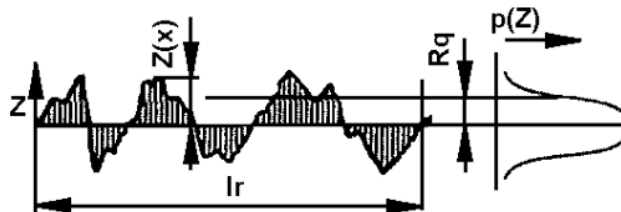
Obrázek 11 – Schéma parametrů pro stanovení R_c ^[16]

Průměrná aritmetická úchylka profilu R_a – aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r . Nevýhodou tohoto parametru je nízká vypovídací schopnost. R_a nereaguje na extrémní změny výšky hrotů a hloubky rýh profilu. ^[16]



Obrázek 12 – Schéma parametru R_a ^[16]

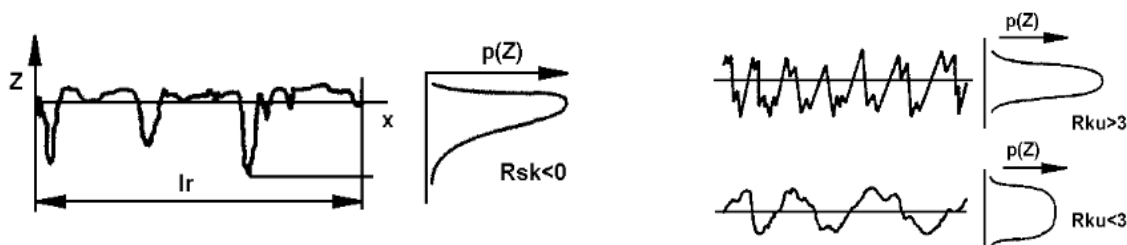
Průměrná kvadratická úchylka profilu R_q – průměrná kvadratická hodnota pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r . Má význam u statistického pozorování profilu povrchu. ^[16]



Obrázek 13 – Schéma parametru R_q ^[16]

Šikmost posuzovaného profilu R_{sk} – podíl průměrných hodnot třetích mocnin pořadnic $Z(x)$ a třetí mocniny R_q v rozsahu základní délky l_r . ^[16]

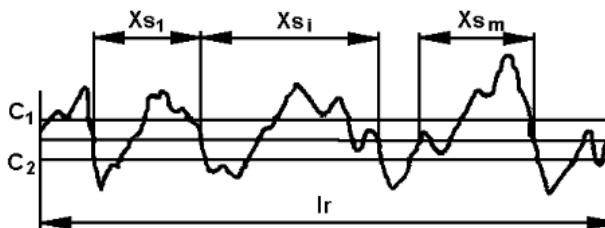
Špičatost posuzovaného profilu R_{ku} – podíl průměrných hodnot čtvrtých mocnin pořadnic $Z(x)$ a čtvrtá mocniny hodnoty R_q v rozsahu základní délky l_r . ^[16]



Obrázek 14 – Schéma parametrů R_{sk} a R_{ku} ^[16]

1.7.3 Délkové parametry drsnosti

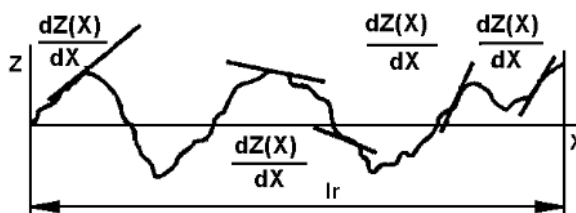
Průměrná vzdálenost prvků profilu RSm – průměrná hodnota šířek prvků Xs profilu v rozsahu základní délky l_r . Pro určení tohoto parametru je nutné znát hladiny řezu C_1 a C_2 .^[16]



Obrázek 15 – Schéma parametru RSm ^[16]

1.7.4 Tvarové parametry drsnosti

Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu $R\Delta q$ – průměrná kvadratická hodnota sklonu pořadnic dZ/dX v rozsahu základní délky l_r . Využívá se v případě hodnocení odrazu světla nebo tribologických vlastností.^[16]



Obrázek 16 – Schéma parametru $R\Delta q$ ^[16]

1.7.5 Metody měření drsnosti

Způsoby měření drsnosti dělíme podle způsobu, jakým snímají a charakterizují povrch. Dotykové metody používají snímač, který je v přímém styku s měřeným povrchem. Na displeji zobrazuje jednotlivé charakteristiky, které se používají při získávání 2D profilu. Bezdotykové metody využívají interference světla mezi měřeným vzorkem a referenčním povrchem. Pomocí tohoto jevu se vytváří topografie povrchu, která se používá při získávání 3D charakteristiky profilu.^[11]

Kontrola porovnáním s etalony drsnosti:

Provádí se pouhým okem nebo pomocí mikroskopu. Porovnává se drsnost povrchu součásti s drsností etalonů. Materiál měřené součásti a použitého etalonu by měl být

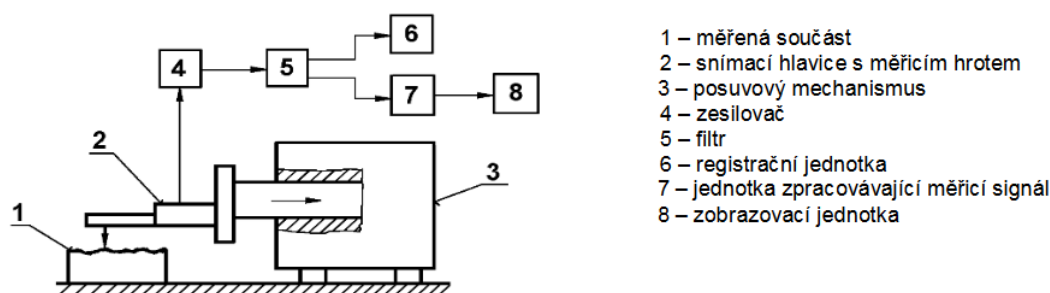
stejný alespoň z hlediska barvy. Technologie výroby povrchu etalonu i součásti by měla být stejná jako tvar povrchu. V místnosti by mělo být dostatečné osvětlení shodné intenzity pro etalon i součást. Přesnost tohoto způsobu kontroly je velice nízká. [16]

Měření pomocí dotykových profilometrů:

Využívá dotykových přístrojů pro zjišťování číselných hodnot jednotlivých parametrů drsnosti. Dotykový profilometr je složen z mechanické a elektronické části. Snímací hrot je umístěn na rameně, jehož pohyb je zajištěn nejčastěji pomocí elektromotorku, případně pneumaticky. Hrot se s ramenem pohybuje konstantní rychlostí a snímá nerovnosti. Elektronická část převede mechanický signál způsobený nerovnostmi na elektrický signál. Ten se nadále zpracovává a výstupem jsou číselné hodnoty jednotlivých parametrů drsnosti, nebo grafický záznam nerovností. Převodníky použité v přístroji fungují na principu piezoelektrickém, magnetoelektrickém, interferometrickém nebo indukčním. [16]

Charakteristiky snímacího systému ovlivňující přesnost měření:

- poloměr zaoblení snímacího hrotu ($2\text{ }\mu\text{m}$, $5\text{ }\mu\text{m}$, $10\text{ }\mu\text{m}$),
- vrcholový úhel snímacího hrotu (60° , 90°),
- přitlačná síla,
- geometrické uspořádání systému snímače,
- rychlost změny měřicí síly. [16]

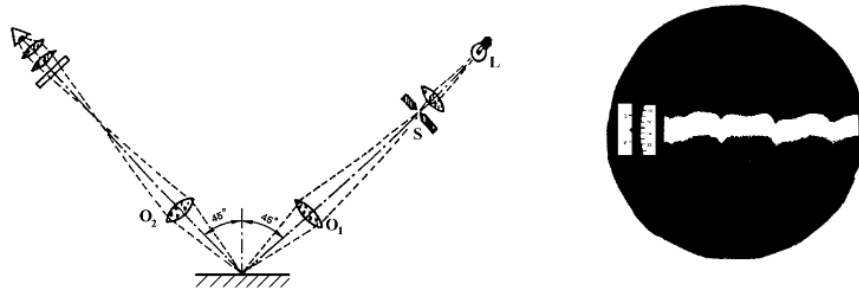


Obrázek 17 – Schéma principu měření dotykovým profilometrem [16]

Měření metodou světelného řezu:

U této metody se pro měření používá nejčastěji dvojitý mikroskop Schmalz. Metoda je založena na principu, kdy svazek paprsku omezený štěrbinou je promítán pomocí optického systému pod úhlem 45° na měřený povrch. Vznikne tenká světelná

rovina, která pronikne nerovnostmi povrchu a vznikne obraz profilu. Profil zobrazuje šikmý řez plochy s nerovnostmi. Použití této metody je díky mikroskopům omezené, ale dvojitě mikroskopy umožňují zvolit zvětšení pomocí výměny objektivu a okuláru. [16]



Obrázek 18 – Schéma principu metody světelného řezu a obrazu v okuláru [16]

Měření pomocí interference světla:

Pro tuto metodu se používají interferenční mikroskopy, kde se nerovnosti projevují jako vychýlení proužků na interferenčním obraze. Ze zdroje světla letí paprsek do polopropustného zrcadla, kde se rozdělí na dva. Jeden z paprsků se odrazí zpět od odrazného zrcadla, druhý se odrazí od povrchu měřené součásti. Oba paprsky se poté interferují (spojí) a v okuláru přístroje vzniknou interferenční proužky. V případě ideálně rovné plochy jsou proužky rovnoběžné a stejnoměrné. [16]



Obrázek 19 – Obraz v okuláru [16]

1.7.6 Výpočet teoretické drsnosti

Teoretickou drsnost lze charakterizovat jako číselnou hodnotu získanou pomocí empirických vztahů. Tyto vztahy byly získány na základě znalostí geometrických tvarů nástroje a obrobku, technologických podmínek a dlouhodobých zkušeností. [18]

Během obrábění kovů a litin v křehkém stavu neprobíhá „čistě“ řezání. Kvůli napjatosti se od základního materiálu odtrhávají některá zrna a vznikají odchylky od teoretického povrchu. Odchylky vznikají ve tvaru nepravidelných prohloubení. Třením hřbetu nože o obrobek se nerovnosti řezné hrany přenáší na obráběný povrch. Na

nerovnosti povrchu má také vliv kmitání. Díky kmitání narůstá pohyb řezné hrany, což ovlivňuje oddělování nárůstku od nástroje. Drsnost povrchu v technické dokumentaci považujeme tedy za limitní hodnotu dosažitelnou v technologickém procesu. ^[5]

Vztah pro výpočet teoretické nerovnosti povrchu:

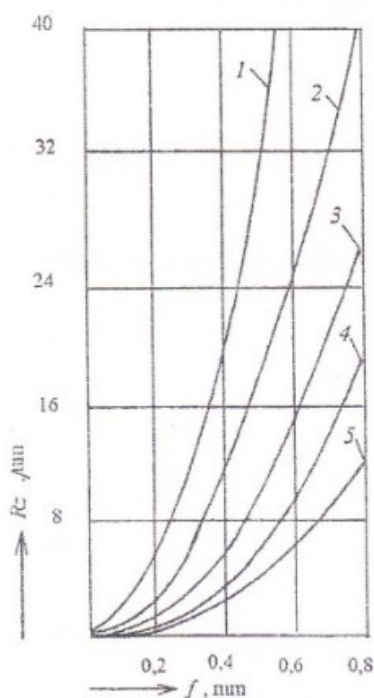
$$R_z = \frac{f_z^2}{8 \cdot r_\epsilon} \quad (1)$$

kde: R_z – největší výška profilu [mm],

r_ϵ – poloměr zaoblení hrotu nástroje [mm],

f_z – posuv na zub [mm]. ^[5]

Tento vztah nám uvádí závislost mezi posuvem, poloměrem zaoblení hrotu nástroje a nerovností povrchu. R_z se zvyšujícím posuvem stoupá parabolicky. Dle zákona hyperboly s nárůstem r_ϵ klesá. Cestou ke zmenšování R_z je využívání malých posuvů a použití nástrojů s většími poloměry hrotu. Použití však musí být možné z pohledu kmitání soustavy. ^[5]



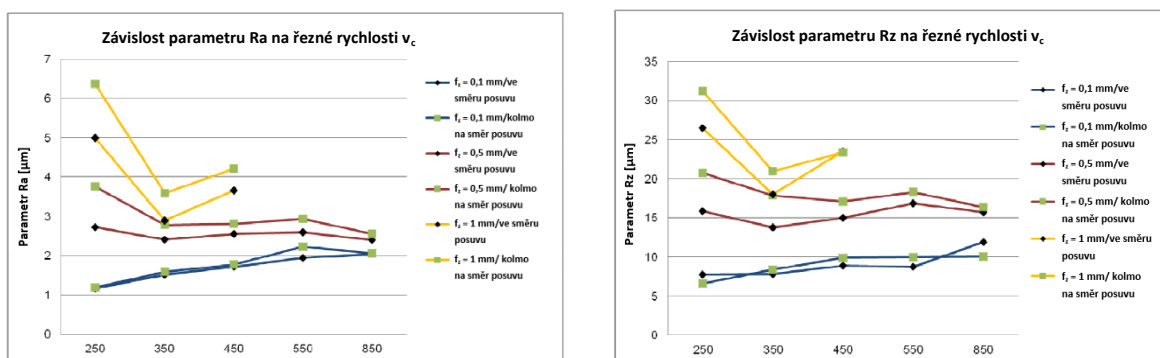
Obrázek 20 – Teoretická závislost mezi R_z , posuvem a poloměrem nástroje ^[5]

1.8 Vliv řezných podmínek na integritu povrchu při frézování

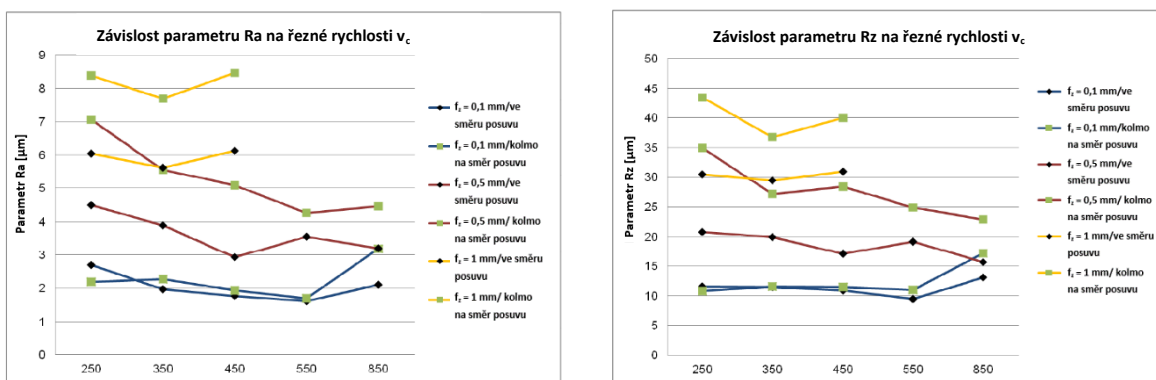
Integrita povrchu je vždy ovlivněna celou řadou různých složek procesu obrábění. Ve výrobním procesu považujeme za hlavní složky obrobek, stroj, nástroj a řezné prostředí. V průběhu vývoje vědy a nových technologií byla provedena řada studií, které se zabývaly vlivem řezných podmínek na výslednou integritu povrchu po frézování. Předmětem těchto studií bylo často posuzování vlivu řezné rychlosti a rychlosti posuvu na integritu povrchu. Byla provedena řada experimentů, kde byly použity různé druhy materiálů a nástrojů. Pro posouzení samotné integrity povrchu byly prováděny měření drsnosti, zbytkových napětí, mikrotvrdosti, mikrostruktury a dalších parametrů na povrchu obrobků frézovaných za různých řezných podmínek. [19]

1.8.1 Drsnost povrchu při čelním frézování

Cílem jedné ze studií bylo zjistit při čelním frézování vliv rychlosti posuvu na kvalitu povrchu se zaměřením na změny průměrné aritmetické úchytky profilu R_a a největší výšky nerovností profilu R_z při různých řezných rychlostech. Byly vybrány oceli 1.1191 a 1.2343, které jsou běžně používané. Jako nástroj byla vybrána šestibřitá fréza s břitovými destičkami ze slinutého karbidu s povlakem PVD. Hloubka řezu byla po celou dobu konstantní a obrábění probíhalo bez použití procesních médií. [19]

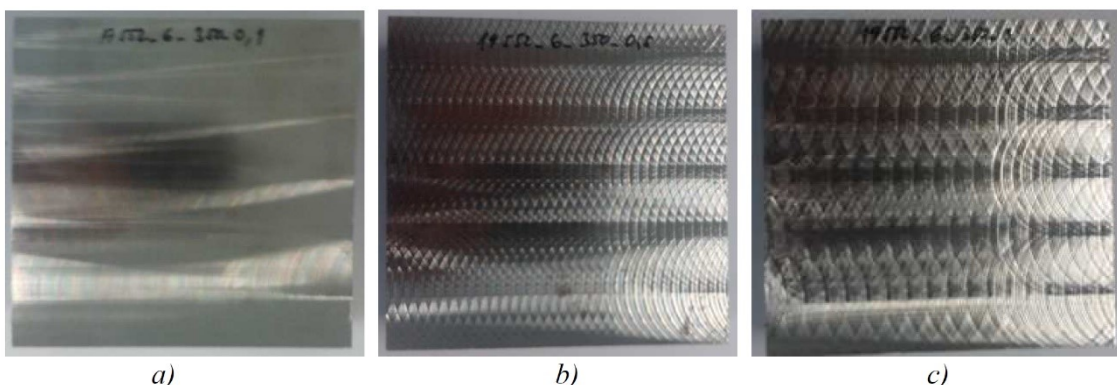


Obrázek 21 – Závislost parametrů drsnosti oceli 1.1191 na řezné rychlosti [19]



Obrázek 22 – Závislost parametrů drsnosti oceli 1.2343 na řezné rychlosti [19]

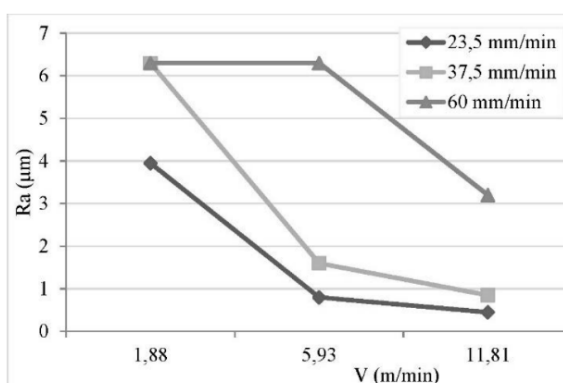
Z výsledných grafů lze vidět, že řezná rychlost v_c se během experimentu pohybovala mezi $250 - 850 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a rychlost posuvu f_z mezi $0,1 - 1 \text{ mm}$. [19]



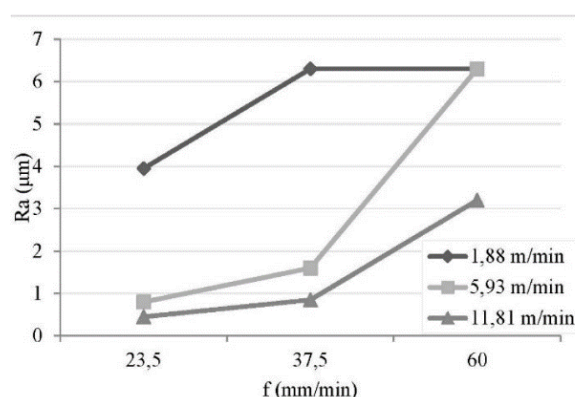
Obrázek 23 – Vzhled povrchu obrobeného různou rychlostí posuvu f_z : a) $0,1 \text{ mm}$, b) $0,5 \text{ mm}$, c) 1 mm [19]

Dle výsledků této studie lze jednoznačně říci, že rychlost posuvu na zub má zcela zásadní vliv na drsnost povrchu. Parametr R_a a R_z se zvyšující rychlostí posuvu zvyšuje u obou materiálů. Snížením rychlosti posuvu a zvýšením řezné rychlosti bylo v tomto konkrétním případě dosaženo klesajícího charakteru měřených parametrů drsnosti, avšak ne ve všech případech. Dle grafů došlo v některých případech ke zvýšení parametrů R_a a R_z při zvýšení řezné rychlosti u stejné rychlosti posuvu. [19]

Jiná studie se zabývala podobnou problematikou. Jako základní materiál byla použita ocel 1.4301. Frézování probíhalo pomocí frézy se třemi vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutého karbidu bez použití procesního média, jako v předchozím případě. V tomto případě se však autor soustředil na vliv řezné rychlosti a rychlosti posuvu na parametr R_a spíše odděleně. [20]



Obrázek 25 – Vliv řezné rychlosti na parametr R_a [20]

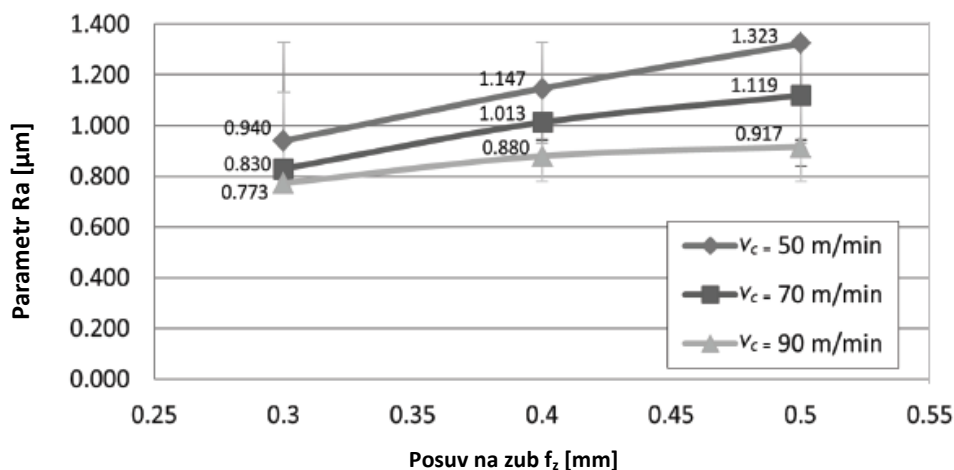


Obrázek 24 – Vliv rychlosti posuvu na Parametr R_a [20]

Dle výsledků této studie zvýšení rychlosti posuvu způsobuje zvýšení drsnosti povrchu. Dle grafů ale zvyšování drsnosti nemá lineární průběh vzhledem k postupnému navyšování rychlosti posuvu. [20]

Zvýšení řezné rychlosti v rozsahu zkoumaných hodnot v tomto případě způsobuje snížení drsnosti povrchu. V důsledku snížení rychlosti posuvu dochází ke zmenšení množství materiálu, který musí v průběhu obrábění fréza odebrat na jeden zub na jednu otáčku. Dochází tím ke snížení řezných sil. To má za následek vznik obrobeného povrchu, který je méně ovlivněn zbytkovým napětím a změnami mikrotvrdosti v podpovrchových vrstvách materiálu. Povrch také za těchto podmínek vykazuje nižší drsnost. [20]

Další studie se zabývala stejným problémem, avšak ne u frézování oceli, ale u slitiny titanu Ti6Al4V. Jako nástroj byla použita dvoubřitá fréza s destičkami ze slinutého karbidu. Na rozdíl od výše uvedených experimentů zde bylo použito procesní médium kvůli charakteru frézování použité slitiny. Řezná rychlost v_c se během frézování pohybovala mezi $50 - 90 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a rychlost posuvu f_z mezi $0,3 - 0,5 \text{ mm}$. [21]



Obrázek 26 – Závislost parametru Ra na rychlosti posuvu na zub [21]

Výsledná naměřená data potvrzují závěry předchozích studií. Zvyšováním řezné rychlosti klesá hodnota Ra. Důvodem je menší řezná zóna plastické deformace způsobená vyšší řeznou rychlostí. U zvyšování rychlosti posuvu bylo pozorováno postupné zvyšování drsnosti povrchu. Naměřená data ukazují, že zároveň dochází ke snižování citlivosti drsnosti povrchu na změnu posuvu na zub se zvyšující se řeznou rychlostí. Vyšší rychlost posuvu jako taková má sice významný vliv na zvyšující se parametr drsnosti Ra, vyšší drsnost je však také způsobena zvýšeným opotřebením nástroje při vyšších posuvech. Vliv opotřebení nástroje na drsnost povrchu však zde nebyl zkoumán. Můžeme tedy říci, že rychlost posuvu má významný vliv na drsnost povrchu nejen u frézování ocelí. [21]

1.8.2 Drsnost povrchu při čelním frézování oceli 316L/1.4404

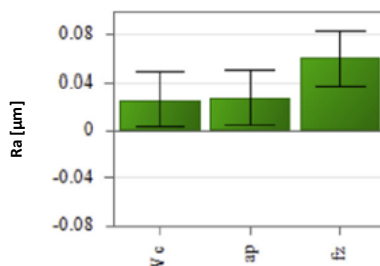
V jedné ze studií byl prováděn výzkum, jak a v jaké míře ovlivňují řezné parametry integritu povrchu při čelním frézování oceli 316L/1.4404. Předmětem zkoumání byl vliv řezné rychlosti, hloubky řezu a rychlosti posuvu na drsnost, tvrdost a zbytková napětí na povrchu materiálu. Byl vypracován statistický model schopný s určitou přesností předvídat jednotlivé parametry integrity povrchu s ohledem na interakce jednotlivých řezných parametrů. Byl určený k minimalizaci nežádoucích vlivů na integritu povrchu způsobených nevhodnou volbou řezných podmínek. K jeho vytvoření bylo potřeba stanovit míru vlivu jednotlivých řezných podmínek na jednotlivé parametry integrity povrchu. [22]

Každý z dílčích testů byl proveden s novými vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutého karbidu, jelikož opotřebení nástroje negativně ovlivňuje integritu obrobeného povrchu. Celý experiment byl prováděn bez použití procesních médií. [22]

Tabulka 2 – Řezné podmínky použité při čelním frézování oceli 316L/1.4404 [22]

Označení	Parametr	Rozsah
v_c	Řezná rychlost	120 – 350 m/min
f_z	Rychlost posuvu na zub	0,15 – 0,35 mm
a_p	Hloubka třísky	1,5 – 3 mm

Dle výsledků studie povrch vykazuje vyšší hodnoty parametru drsnosti R_a při vyšších rychlostech posuvu. Dále se také při vyšších rychlostech posuvu a vyšších řezných rychlostech vyskytuje zvýšený počet makroskopických defektů povrchu. K tomu přispívá sklon k tvorbě nárůstku na čelní ploše frézy v důsledku vysokých teplot, které vznikají při řezném procesu. Samotná řezná rychlost a hloubka řezu ovlivňuje drsnost povrchu málo. Byla však prokázána silná závislost mezi drsností povrchu a rychlostí posuvu, která byla znázorněna na obrázku níže ve srovnání s ostatními řeznými podmínkami. [22]



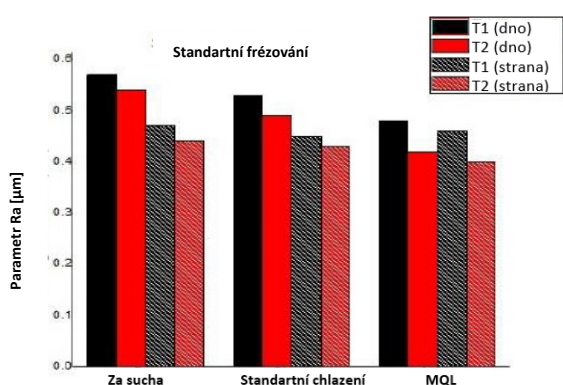
Obrázek 27 – Závislost drsnosti povrchu na řezných podmínkách u oceli 316L/1.4404 při čelním frézování [22]

Podle dosavadních studií rychlost posuvu při čelním frézování nejvíce ovlivňuje výslednou drsnost. Ta je ovlivněna také řeznou rychlostí v kombinaci s hloubkou záběru. Množství odebraného materiálu na zub na jednu otáčku má přímý vliv na velikost řezných sil během řezného procesu. V souvislosti s těmito silami má velký význam tuhost obráběcího stroje. Příliš velká hloubka řezu v důsledku velkých řezných sil při nedostatečné tuhosti stroje může způsobit vibrace, které mohou zapříčinit výrazné zhoršení různých parametrů integrity povrchu včetně drsnosti. [22] [23]

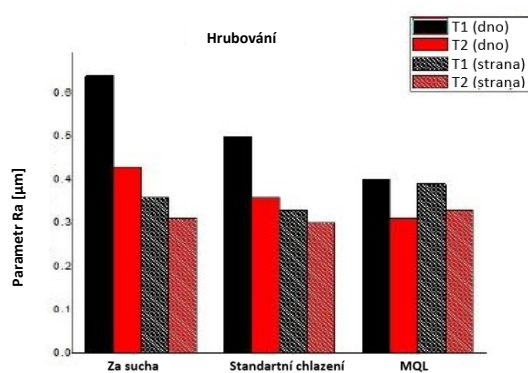
1.8.3 Drsnost povrchu při frézování oceli 316L/1.4404 za použití chlazení

Ve výrobní praxi nelze hledět pouze na kvalitu obrobeného povrchu, ale je nutné vzít v úvahu také náklady spojené s výrobou. Je tedy nutné se snažit o zvýšení životnosti nástroje. Jednou z možností prodloužení životnosti nástroje je použití procesního média. Jak je uvedeno výše, opotřebení nástroje má negativní vliv na kvalitu obrobeného povrchu. Proto nastává otázka, do jaké míry může procesní médium nejen zvýšit životnost nástroje, ale také zlepšit kvalitu povrchu z hlediska jeho drsnosti. [24]

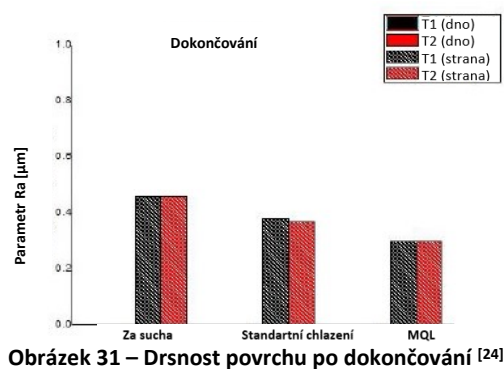
Na tuto problematiku byla zaměřena studie, kde probíhalo měření drsnosti po frézování. Byly použity dva druhy nástrojů a měření probíhalo za sucha, za použití standardního chlazení a za použití chlazení mlhou (MQL). Je však nutné si uvědomit, že výsledná drsnost povrchu je ovlivněna nejen způsobem chlazení, ale také mazací schopností samotného média. Měření drsnosti povrchu bylo prováděno po stranách a na čele frézovaného materiálu. [24]



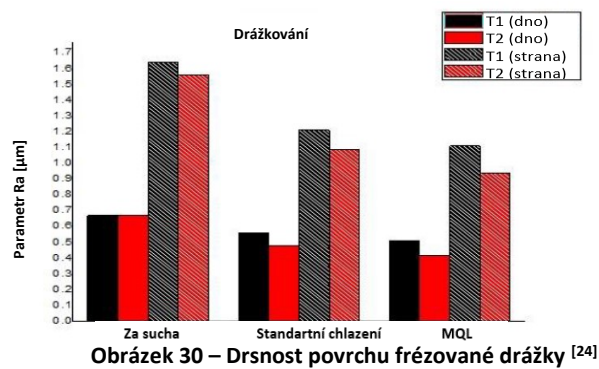
Obrázek 29 – Drsnost povrchu po standardním frézování [24]



Obrázek 28 – Drsnost povrchu po hrubování [24]



Obrázek 31 – Drsnost povrchu po dokončování [24]



Obrázek 30 – Drsnost povrchu frézované drážky [24]

Z naměřených dat lze usoudit, že přítomnost procesního média při řezném procesu má pozitivní vliv na snižování drsnosti povrchu. Při všech operacích bylo dle studie dosaženo nejnižší drsnosti při použití chlazení, ve většině případů u chlazení pomocí mlhy. To, jak moc bude drsnost povrchu ovlivněna procesním médiem však záleží také na konkrétní operaci, množství použitého procesního média, vzdálenosti a úhlu nastavení trysky, a dalších parametrech. [24]

2 Návrh experimentální činnosti frézování

Experiment spočíval v měření drsnosti povrchu zkoušeného obrobku po čelním frézování. Zkušební obrobek byl zhotoven z oceli 316L/1.4404. Frézování probíhalo sousledně s 80 % překrytím. Jako nástroj byla použita pětibřitá fréza s břitovými destičkami od výrobce SANDVIK Coromant. Hloubka řezu byla po celou dobu experimentu 3 mm. Obrábění probíhalo bez použití procesního média, tedy za sucha. Během experimentu se současně provádělo také měření řezných sil, které měřil kolega.

Samotné měření drsnosti povrchu probíhalo ve směru kolmém na směr posuvu. Při obrábění byly použity tři řezné rychlosti a tři různé rychlosti posuvu. Celkově bylo provedeno 9 měřicích cyklů.

Tabulka 3 – Přehled parametrů provedených měření

Číslo měření	Řezná rychlost v_c [m·min ⁻¹]	Rychlost posuvu f_z [mm]	Hloubka třísky a_p [mm]
1	250	0,14	3
2	250	0,12	3
3	250	0,09	3
4	200	0,14	3
5	200	0,12	3
6	200	0,09	3
7	150	0,14	3
8	150	0,12	3
9	150	0,09	3

2.1 Zkoušený materiál

Zkoušeným materiálem byla korozivzdorná ocel 316L/1.4404. Tato ocel má uplatnění v chemickém, potravinářském a farmaceutickém průmyslu u součástí vyžadujících odolnost proti korozi. Je odolná především proti důlkové korozi za přítomnosti chloridů, kyselině sírové a kyselině fosforečné. Styk s kyselinou dusičnou a jejími výpary je nevhodný. Nevykazuje náchylnost vůči mezikrystalické korozi v tepelně ovlivněných oblastech. Má velmi dobrou svařitelnost velkým množstvím postupů a je možno ji zpracovávat tvářením za studena. Dobrá je i její třísková obrobiteľnosť. ^{[25] [26]}

Používá se především u svařovaných dílů, které nelze po svařování žíhat a je u nich riziko vytváření mezikrystalové koroze. Dále také u svařovaných konstrukcí

v agresivních prostředí průmyslového typu a přímořských prostředích. Využití nachází také u součástí vyžadujících vysoký lesk po leštění. [25] [26]

	USA	Německo	Česká republika
DIN W. Nr.	ASTM ASME AISI	DIN 17 440 DIN 17 441	ČSN ekvivalent
1.4000	410S	X6Cr13	17 020
1.4016	430	X6Cr17	17 040
1.4301	304	X5CrNi18 10	17 240
1.4307	304L	X2CrNi18 9	
1.4306	304L	X2CrNi19 11	17 249
1.4310	301	X12CrNi17 7	
1.4305	303	X8CrNiS 18-9	17 243
1.4404	316L	X2CrNiMo17 13 2	17 349

Obrázek 32 – Kvalita a ekvivalenty oceli 314L/1.4404 [27]

Jakost		C	Cr	Ni	Mn	Mo	Ti	Si
DIN 1.4000	ČSN 17020	< 0,08	12,0 - 14,0		< 1,0			
DIN 1.4016	ČSN 17 040	< 0,08	15,5 - 17,5		< 1,0			
DIN 1.4301	ČSN 17 240	< 0,07	17,5 - 19,5	8,0-10,5	< 2,0			
DIN 1.4306	ČSN 17 249	< 0,03	18,0 - 20,0	10,0-12,0	< 2,0			
DIN 1.4307		< 0,03	17,5 - 19,5	8,0-10,5	< 2,0			
DIN 1.4305	ČSN 17 243	< 0,10	17,0 - 19,0	8,0-10,0	< 2,0			
DIN 1.4404	ČSN 17 349	< 0,03	16,5 - 18,5	10,0-13,0	< 2,0	2,0-2,5		

Obrázek 33 – Chemické složení oceli 314L/1.4404 v % [27]

Jakost	Pevnost	Mez skluзу		Tažnost	Svařování	Tažnost Tvárění	Korozní odolnost	max. T použití
	Rm (MPa)	RP0,1 (MPa)	RP0,2 (MPa)	A 50 (50%)				
1.4016	450-600		280	20	2	2	2	100°C
1.4301	540-750	260	230	45	3	5	3	400°C
1.4306	520-670	250	220	45	5	4	4	650°C
1.4307	520-700	250	220	45	4	5	4	400°C
1.4401	530-680	270	240	40	4	3	5	500°C
1.4404	530-680	270	240	40	5	4	5	400°C

Obrázek 34 – Mechanické vlastnosti oceli 314L/1.4404 [27]

2.2 Použitý stroj pro přípravu vzorku

Pro frézování vzorku bylo použito vertikální obráběcí centrum MCV 1270 POWER od výrobce Kovosvit MAS. Tento stroj je schopen vysoce efektivního obrábění pomocí vysokorychlostních vřeten a vysokých posuvů. Má posuvné kryty, které odkrývají jeden roh pracovního prostoru a díky tomu umožňuje snadný přístup do pracovního prostoru. Nosný rám vyniká vysokou tuhostí, tudíž je možné na stroji provádět silové obrábění, nebo velmi přesné obrábění složitých součástí. Na stroji je možné také vysokorychlostní obrábění forem díky dynamice lineárních os. [28]



Obrázek 35 – Obráběcí centrum MCV 1270 POWER [28]

Tabulka 4 – Specifikace obráběcího centra MCV 1270 POWER [28]

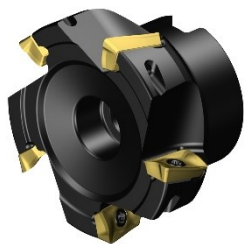
Stůl		
Upínací plocha stolu	mm	1500 × 670
T-drážky (počet × šířka × rozteč)	mm	5 × 18 × 125
Maximální zatížení stolu	kg	1 200
Pracovní rozsah		
X-osa	mm	1270
Y-osa	mm	610
Z-osa	mm	720
Vzdálenost čela vřetena od upínací plochy stolu	mm	120 – 840
Vřeteno		
Kuželová dutina vřetena		ISO 50
Maximální otáčky	min ⁻¹	8000
Změna otáček		2 stupně
Posuv		
Pracovní posuv X, Y, Z	mm·min ⁻¹	1 - 40 000
Rychloposuv X, Y, Z	m·min ⁻¹	40

Zásobník nástrojů		
Počet míst v zásobníku		24
Max. délka nástroje	mm	400
Max. průměr nástroje	mm	125
Čas výměny sousedního nástroje	s	5
Max. hmotnost nástroje	kg	15
Motor		
Výkon motoru včetně	kw	43
Jmenovitý kroutící moment	Nm	623
Max. celkový příkon stroje	kVa	55
Další parametry		
Odměrování X, Y, Z		přímé
Přesnost nastavení polohy	mm	0,01
Pracovní tlak vzduchu	MPa	0,55 - 0,6
Rozměry (d × š × v)	mm	5000 × 3600 × 3330
Hmotnost stroje	kg	11 800

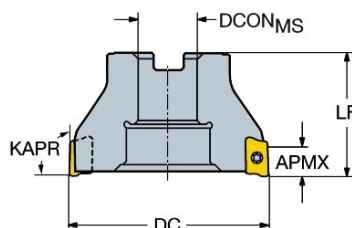
Program pro frézování na obráběcím centru v laboratoři VŠB-TUO Ostrava byl vytvořen v řídicím systému HEIDENHEIN iTNC 640.

2.3 Použitý nástroj a břitové destičky

Pro obrábění byla použita čelní fréza R390-063Q22-17M od výrobce SANDVIK Coromant. Na této fréze bylo upnuto 5 vyměnitelných břitových destiček (VBD). Délka vyložení nástroje byla 60 mm.



Obrázek 36 – Fréza R390-063Q22-17M [29]



Obrázek 37 – Schéma čelní frézy R390-063Q22-17M [29]

Tabulka 5 – Technické parametry čelní frézy R390-063Q22-17M [29]

Řezný průměr (DC)	63 mm
Počet řezných prvků (CICT)	5
Maximální hloubka řezu (APMXEFW)	15,7 mm
Spojovací průměr (DCON)	22 mm
Funkční délka (LF)	40 mm

Vyměnitelné břitové destičky (VBD) byly také od výrobce SANDVIK Coromant. Jednalo se o VBD s označením R390-17 04 08M-MM 2040.



Obrázek 38 – Vyměnitelná břitová destička R390-17 04 08M-MM 2040 [30]

Tabulka 6 – Technické parametry VBD R390-17 04 08M-MM 2040 [30]

Povlak	CVD TiCrN+Al ₂ O ₃ +TiN
Délka hladicího břitu (BS)	1,5 mm
Šířka břitové destičky (W1)	9,6 mm
Účinná délka břitu (LE)	15,7 mm
Poloměr rohu (RE)	0,8 mm
Tloušťka destičky (S)	4,763 mm



Obrázek 39 – Sada vyměnitelných břitových destiček použitých při frézování

Materiál 316L/1.4404 použitý pro přípravu vzorků a následnému měření drsnosti patří do skupiny M. Skupina M se používá při obrábění materiálů tvořících střední a delší třísku. Díky vysoké houževnatosti slinutých karbidů patřících do této skupiny se používají pro přerušované řezy a těžké hrubování. Řezné síly dosahují středních až vysokých hodnot. [31]

Tabulka 7 – Výrobce doporučené maximální hodnoty posuvu a řezné rychlosti

Skupina	Posuv na zub f_z	Řezná rychlost v_c
P (modrá)	0,15 mm (0,08 – 0,20)	230 m/min (235 – 225)
M (žlutá)	0,15 mm (0,08 – 0,20)	255 m/min (265 – 250)

2.4 Použité měřicí přístroje

K měření drsnosti byl použit přenosný dílenský přístroj na měření drsnosti povrchu HOMMEL-ETAMIC W5 třídy přesnosti 1 podle DIN 4772. Jedná se o přístroj s vlastním akumulátorem schopným na jedno nabití provést až 800 měření. Lze jej použít na měření 25 parametrů drsnosti. Má vestavěnou mikro SD kartu s pamětí na 10 tisíc měření. Je možné na něm sestavit 5 měřicích programů. Pro snadnou práci má barevný displej, osvětlení snímače, Bluetooth a USB rozhraní. [32]



Obrázek 40 – Přístroj na měření drsnosti povrchu HOMMEL-ETAMIC W5 – pohled shora



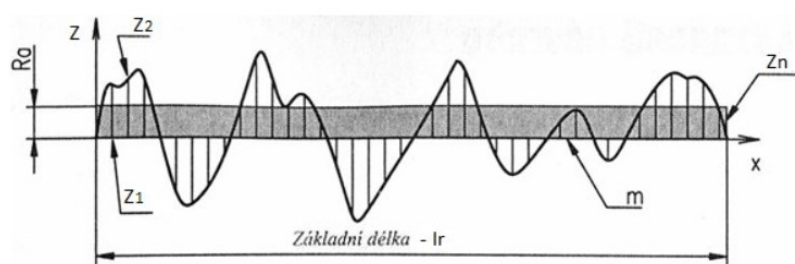
Obrázek 41 – Přístroj na měření drsnosti povrchu HOMMEL-ETAMIC W5 – pohled zdola

Tabulka 8 – Parametry drsnoměru HOMMEL-ETAMIC W5 [32]

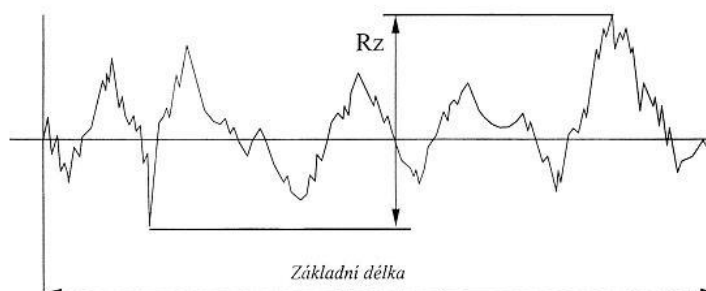
DIN EN ISO 4287	Ra, Rz, Rt, Rq, RSm, Rmr (%), Rmr (µm), Rp, Rmax
Délky měřeného úseku	1,5/4,8/15 mm
Snímač	induktivní, hrot 2 µm/90°, přitlačná síla 1,5 mN
Rozlišení	0,005 µm
Třída přesnosti	1 dle DIN 4772 (±5 %)
Rozměry D × V × Š	128 × 63 × 50 mm
Hmotnost	270 g

2.5 Měřené parametry drsnosti povrchu

Během experimentu byly měřeny dva parametry drsnosti. Prvním byla průměrná aritmetická úchylka profilu R_a . Jedná se o aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r . Tento parametr má nízkou vypovídací schopnost. Nemá dostatečnou citlivost a zohlednění extrémních změn výšky hrotů a hloubky rýh profilu. Druhým parametrem byla největší výška profilu R_z . Je to součet výšky největšího výstupku Z_p a hloubky nejnižší prohlubně Z_v základní délce l_r .^[16]



Obrázek 42 – Průměrná aritmetická úchylka profilu R_a ^[33]



Obrázek 43 – Největší výška profilu R_z ^[33]

Vztahy pro určení parametrů drsnosti R_a a R_z :

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z_x| dx \quad (2)$$

$$R_z = Z_{v_{max}} + Z_{p_{max}} \quad (3)$$

kde: l_r – základní délka profilu [mm],

$Z(x)$ – výška profilu v poloze x [μm],

$Z_{v_{max}}$ – největší hloubka prohlubně profilu v základní délce [μm],

$Z_{p_{max}}$ – největší výška výstupku profilu v základní délce [μm].^[11]

3 Vyhodnocení hodnot parametrů drsnosti povrchu

Pro frézování zkoušeného materiálu byly použity tři různé řezné rychlosti a tři různé posuvy při sousledném frézování. Hloubka záběru byla po celou dobu měření 3 mm. Během měření bylo celkem provedeno devět dílčích měření drsnosti povrchu zkoušené oceli 316L/1.4404 pro odlišné řezné podmínky. Měření se provádělo vždy ve směru kolmém na směr posuvu 5x za sebou. Měřenými a vyhodnocovanými parametry drsnosti povrchu byly Ra a Rz.

3.1 Naměřené hodnoty Ra a Rz

Tabulka 9 – Naměřené hodnoty Ra a Rz při řezné rychlosti 250 m·min⁻¹

Číslo měření	$v_c = 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$					
	$f_z = 0,14 \text{ mm}$		$f_z = 0,12 \text{ mm}$		$f_z = 0,09 \text{ mm}$	
	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	0,685	2,957	0,934	4,107	0,468	2,426
2	0,666	2,061	1,369	5,532	0,576	2,353
3	0,637	2,416	0,794	3,934	0,337	2,016
4	0,510	2,293	1,413	5,412	0,321	1,701
5	0,595	2,345	1,297	5,330	0,527	2,528
Suma x_i	3,093	12,072	5,807	24,315	2,229	11,024
Průměr	0,6186	2,4144	1,1614	4,863	0,4458	2,2048

Tabulka 10 – Naměřené hodnoty Ra a Rz při řezné rychlosti 200 m·min⁻¹

Číslo měření	$v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$					
	$f_z = 0,14 \text{ mm}$		$f_z = 0,12 \text{ mm}$		$f_z = 0,09 \text{ mm}$	
	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	0,550	2,105	0,584	2,487	0,475	2,200
2	0,727	2,526	0,725	2,714	0,576	2,605
3	0,573	2,246	0,874	2,955	0,690	2,770
4	0,680	2,756	0,879	2,952	0,401	2,159
5	0,547	2,285	0,711	2,815	0,420	2,212
Suma x_i	3,077	11,918	3,773	13,923	2,562	11,946
Průměr	0,6154	2,3836	0,7546	2,7846	0,5124	2,3892

Tabulka 11 – Naměřené hodnoty Ra a Rz při řezné rychlosti 150 m·min⁻¹

Číslo měření	$v_c = 150 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$					
	$f_z = 0,14 \text{ mm}$		$f_z = 0,12 \text{ mm}$		$f_z = 0,09 \text{ mm}$	
	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	0,519	2,196	0,745	2,704	0,472	1,802
2	0,512	2,223	0,786	2,753	0,581	2,278
3	0,592	2,513	0,805	2,834	0,508	2,273
4	0,341	1,908	0,742	2,513	0,440	1,854
5	0,511	2,240	0,788	2,803	0,729	2,493
Suma x_i	2,475	11,08	3,866	13,607	2,73	10,7
Průměr	0,495	2,216	0,7732	2,7214	0,546	2,14

3.2 Testování hodnot na výskyt hrubých chyb

Výsledky měření zatížené hrubou chybou jsou pro vyhodnocování nepoužitelné. Tyto hodnoty se ze souboru hodnot vylučují. Mezi příčiny hrubých chyb patří nesprávný odečet údaje, vada přístroje, nesprávná manipulace s měřidlem, nesprávně provedené měření apod. ^[16]

Pro otestování naměřených hodnot byl použit Grubbsův test extrémních odchylek. Tento test se provádí pomocí výpočtu aritmetického průměru hodnot a výběrové směrodatné odchylky ze všech naměřených hodnot testovaného souboru. Poté se vypočítá testovací kritérium, které se porovnává s tabulkovou kritickou hodnotou pro příslušné n testovaného souboru.

Výpočet testovacího kritéria:

$$H_2 = \frac{\bar{x} - x_2}{s(x)} \quad H_n = \frac{x_n - \bar{x}}{s(x)} \quad (4)$$

kde: \bar{x} – průměrná hodnota [μm],

$s(x)$ – výběrová směrodatná odchylka [μm],

x_n – naměřené hodnoty. ^[16]

U našeho měření je kritická hodnota 1,67. Pokud bude $H_2 < 1,67$ a $H_n > 1,67$, tak měřená hodnota x_2 není zatížena hrubou chybou, ale hodnota x_n ano a musí být vyloučena ze souboru hodnot. ^[16]

Testování na hrubé chyby bylo provedeno pro všechny měřené hodnoty. Dle se v naměřených hodnotách nevyskytuje hodnota zatížená hrubou chybou.

3.3 Výpočet nejistot měření

1. Standartní nejistota typu A (u_A):

Získává se opakovaným měřením pomocí výpočtu směrodatné odchylky. Hodnota nejistoty ze zvyšujícím počtem měření zmenšuje. ^[16]

Postup výpočtu:

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n - 1)}} \quad [\mu\text{m}] \quad (5)$$

kde: $s(\bar{x})$ – směrodatná odchylka [μm],

x_i – naměřené hodnoty [μm],

\bar{x} – průměrná hodnota [μm],

n – počet měření. ^[16]

Příklad výpočtu z tabulky č.8:

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n - 1)}} = \sqrt{\frac{0,0193}{5 \cdot (5 - 1)}} = 0,0311 \mu\text{m}$$

2. Standardní nejistota typu B (u_B):

U této nejistoty nezáleží na počtu měření. Metodika této nejistoty je určena jiným způsobem než výpočtem směrodatné odchylky, jako u předchozí metody. Plyne z údajů nejistot stanovených měřidel, nejistoty určení tabulkových koeficientů, specifikace metrologických vlastností měřidel apod. ^[16]

Postup výpočtu:

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2} \quad [\mu\text{m}] \quad (6)$$

kde: u_{B1} – nejistota vlivu opěrné patky snímacího hrotu [μm],

u_{B2} – nejistota měřicího přístroje – u nás $u_{B2} = 0,005$ [μm]. ^[4]

$$u_{B1} = \frac{\bar{x} \cdot z_{1\max}}{k} \quad [\mu\text{m}] \quad (7)$$

kde: $z_{1\max}$ – hodnota určená z přesnosti přístroje $\pm 5 \%$,

k – součinitel pro rovnoměrné rozdělení dle zákona rozdělení $k = \sqrt{3}$. ^[4]

Příklad výpočtu z tabulky č.8:

$u_{B1} = \frac{\bar{x} \cdot z_{1\max}}{k}$	$u_{B2} = \bar{x} \cdot 0,005$	$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2}$
$u_{B1} = \frac{0,6186 \cdot 0,05}{\sqrt{3}}$	$u_{B2} = 0,6186 \cdot 0,005$	$u_B = \sqrt{0,0179^2 + 0,0031^2}$
$u_{B1} = 0,0179 \mu\text{m}$	$u_{B2} = 0,0031 \mu\text{m}$	$u_B = 0,0181 \mu\text{m}$

3. Kombinovaná standartní nejistota (u_c):

Stanovuje výsledný efekt nejistot typu A a B. ^[16]

Postup výpočtu:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad [\mu\text{m}] \quad (8)$$

kde: u_A – nejistota typu A [μm],

u_B – nejistota typu B [μm]. ^[16]

Příklad výpočtu z tabulky č.8:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

$$u_c = \sqrt{0,0311^2 + 0,0181^2}$$

$$u_c = 0,0360 \mu\text{m}$$

4. Rozšířená kombinovaná nejistota (U_c):

Omezuje nejistotu výsledku měření pro určitou spolehlivost. ^[16]

Postup výpočtu:

$$U_c = k_u \cdot u_c \quad [\mu\text{m}] \quad (9)$$

kde: k_u – koeficient rozšíření, $k_u = 2$ platí pro spolehlivost 95 %.

Příklad výpočtu z tabulky č.8:

$$U_c = k_u \cdot u_c$$

$$U_c = 2 \cdot 0,0360$$

$$U_c = 0,072 \mu\text{m}$$

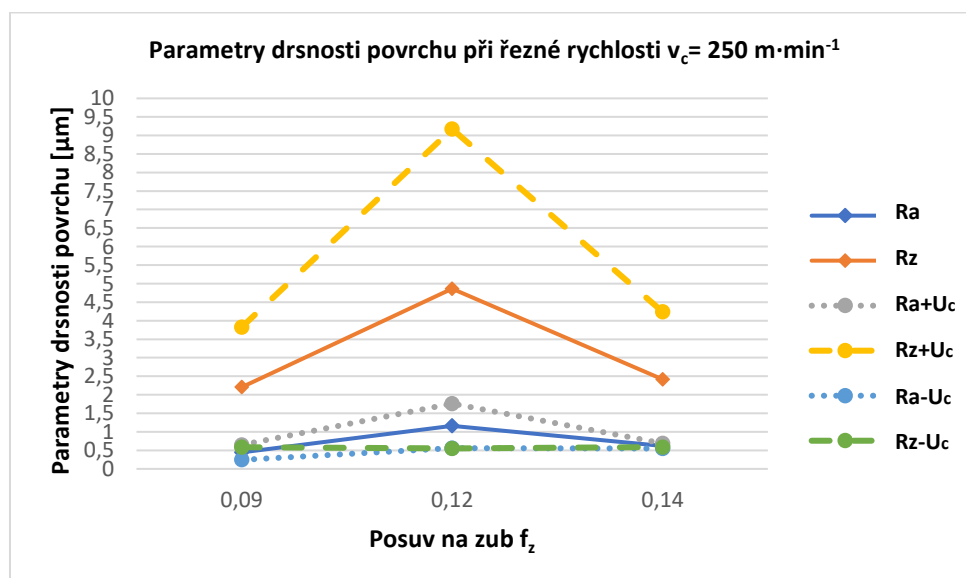
Tyto výpočty byly provedeny pro všechny naměřené hodnoty.

3.4 Vyhodnocení naměřených hodnot parametrů Ra a Rz

Průměrné hodnoty parametrů drsnosti povrchu naměřené během experimentu byly vneseny do grafů pro grafické znázornění toho, jak se parametry drsnosti měnily v závislosti na změně posuvu při určité řezné rychlosti.

Tabulka 12 – Průměrné hodnoty parametrů drsnosti naměřené při $v_c = 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ s výslednými nejistotami

Vypočtená hodnota	$v_c = 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$					
	$f_z = 0,09 \text{ mm}$		$f_z = 0,12 \text{ mm}$		$f_z = 0,14 \text{ mm}$	
	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
Průměr	0,4458	2,2048	1,1614	4,863	0,6186	2,4144
u_A	0,1002	0,8076	0,2987	2,1503	0,0311	0,9100
u_{B1}	0,0129	0,0636	0,0335	0,1404	0,0179	0,0697
u_{B2}	0,0022	0,0110	0,0058	0,0243	0,0031	0,0121
u_B	0,0131	0,0646	0,0340	0,1425	0,0181	0,0707
u_c	0,1010	0,8102	0,3006	2,1550	0,0360	0,9128
U_c	0,2021	1,6204	0,6013	4,3100	0,0720	1,8256



Obrázek 44 – Průměrné parametry drsnosti povrchu při řezné rychlosti $v_c = 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

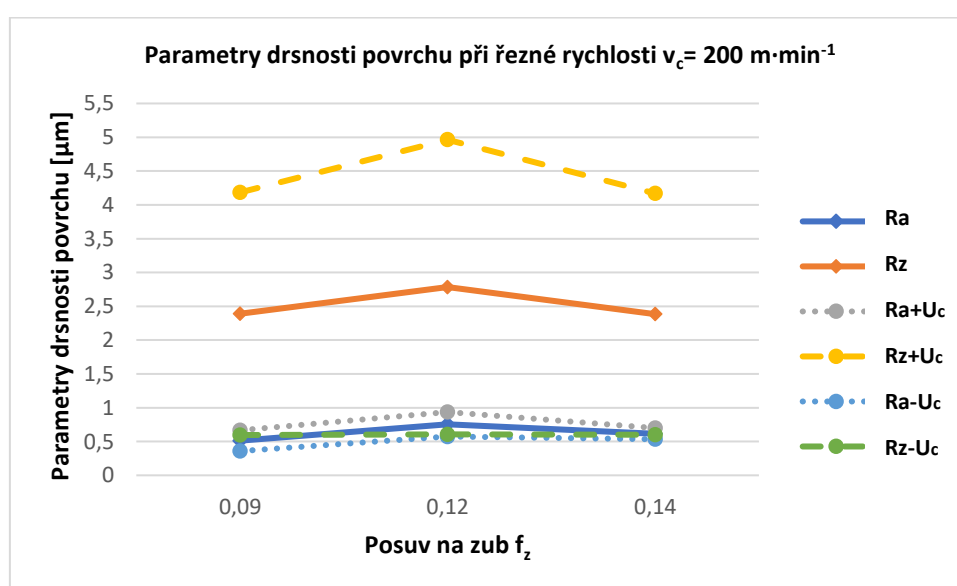
Dle grafu dochází při zvýšení posuvu z $f_z = 0,09 \text{ mm}$ na $f_z = 0,12 \text{ mm}$ ke zvýšení parametru drsnosti Ra a Rz o více než polovinu. Při opětovném zvýšení na $f_z = 0,14 \text{ mm}$ dochází ke znatelnému poklesu Ra a Rz. Zajímavým poznatkem je to, že k poklesu hodnot drsnosti při zvýšení posuvu na $f_z = 0,14 \text{ mm}$ dochází ke snížení hodnot drsnosti až na hodnoty velmi blízké hodnotám u původního posuvu $f_z = 0,09 \text{ mm}$.



Obrázek 45 – Vzhled povrchu obrobku po frézování s $v_c = 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

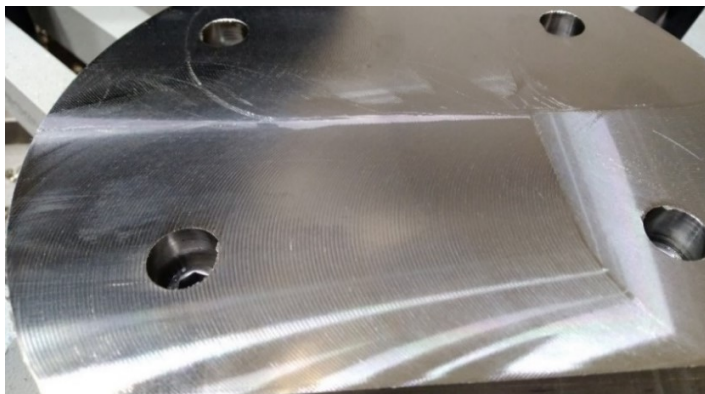
Tabulka 13 – Průměrné hodnoty parametrů drsnosti naměřené při $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ s výslednými nejistotami

Vypočtená hodnota	$v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$					
	$f_z = 0,09 \text{ mm}$		$f_z = 0,12 \text{ mm}$		$f_z = 0,14 \text{ mm}$	
	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
Průměr	0,5124	2,3892	0,7546	2,7846	0,6154	2,3836
u_A	0,0756	0,8941	0,0878	1,0865	0,0370	0,8900
u_{B1}	0,0148	0,0690	0,0218	0,0804	0,0178	0,0688
u_{B2}	0,0026	0,0119	0,0038	0,0139	0,0031	0,0119
u_B	0,0150	0,0700	0,0221	0,0816	0,0180	0,0698
u_C	0,0771	0,8968	0,0905	1,0896	0,0412	0,8927
U_C	0,1542	1,7936	0,1810	2,1791	0,0824	1,7854



Obrázek 46 – Průměrné parametry drsnosti povrchu při řezné rychlosti $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

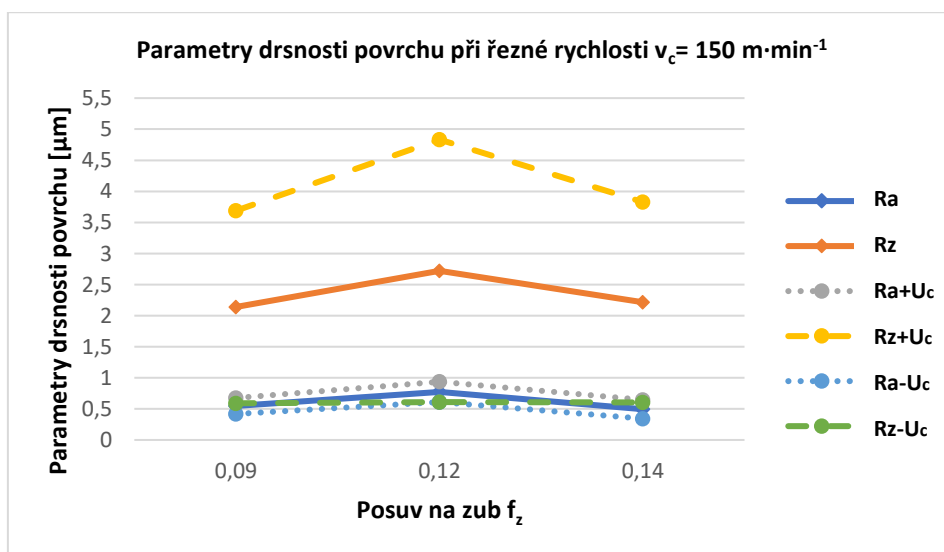
Graf má velmi podobný průběh, jako graf minulý. Nejvyšší hodnota Ra se snížením řezné rychlosti trochu snížila, hodnota Rz se celkově snížila výrazně. Lze říci, že snížení řezné rychlosti na $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ mělo za následek snížení drsnosti povrchu.



Obrázek 47 – Vzhled povrchu obrobku po frézování s $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

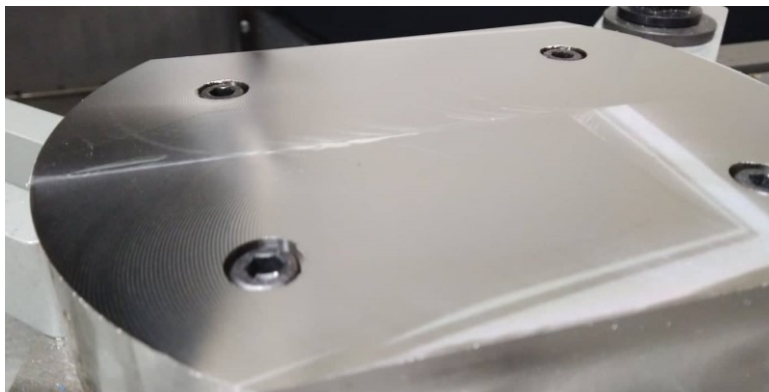
Tabulka 14 – Průměrné hodnoty parametrů drsnosti naměřené při $v_c = 150 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ s výslednými nejistotami

Vypočtená hodnota	$v_c = 150 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$					
	$f_z = 0,09 \text{ mm}$		$f_z = 0,12 \text{ mm}$		$f_z = 0,14 \text{ mm}$	
	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
Průměr	0,546	2,14	0,7732	2,7214	0,495	2,216
u_A	0,0629	0,7724	0,0783	1,0529	0,0744	0,8044
u_{B1}	0,0158	0,0618	0,0223	0,0786	0,0143	0,0640
u_{B2}	0,0027	0,0107	0,0039	0,0136	0,0025	0,0111
u_B	0,0160	0,0627	0,0227	0,0797	0,0145	0,0649
u_C	0,0649	0,7749	0,0815	1,0559	0,0758	0,8071
U_C	0,1299	1,5498	0,1631	2,1119	0,1516	1,6141

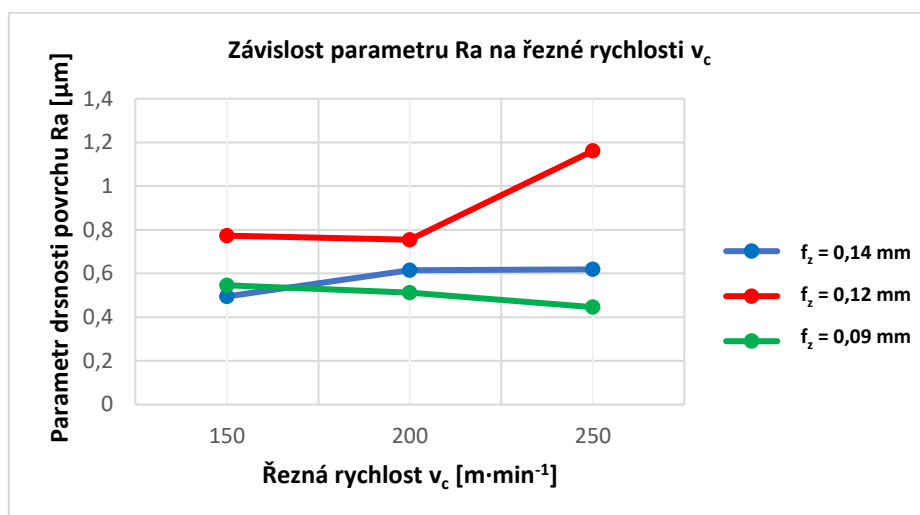


Obrázek 48 – Průměrné parametry drsnosti povrchu při řezné rychlosti $v_c = 150 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

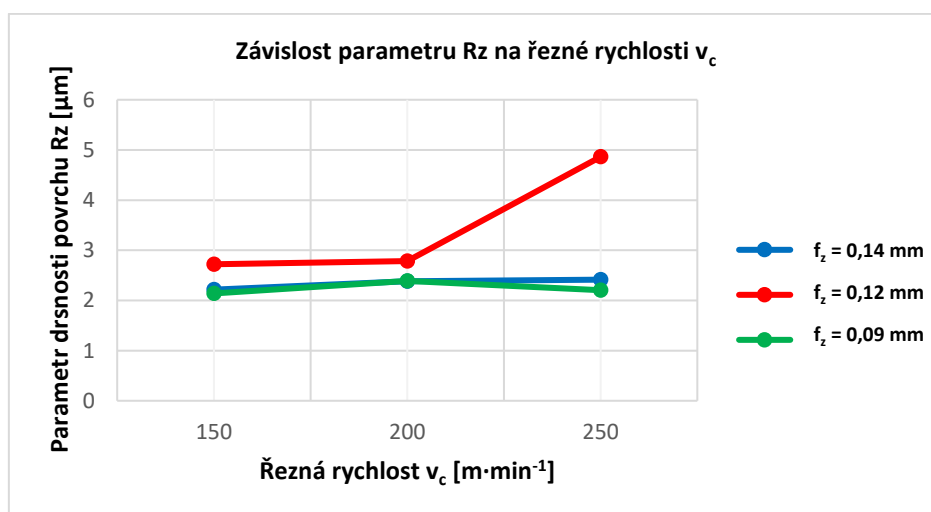
Dle grafu a naměřených hodnot došlo u řezné rychlosti $v_c = 150 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ k velmi mírnému poklesu parametrů drsnosti oproti $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Průběh grafu zůstává stejný jako v předchozích dvou případech.



Obrázek 49 – Vzhled povrchu obrobku po frézování s $v_c = 150 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$



Obrázek 50 – Závislost parametru R_a na řezné rychlosti v_c

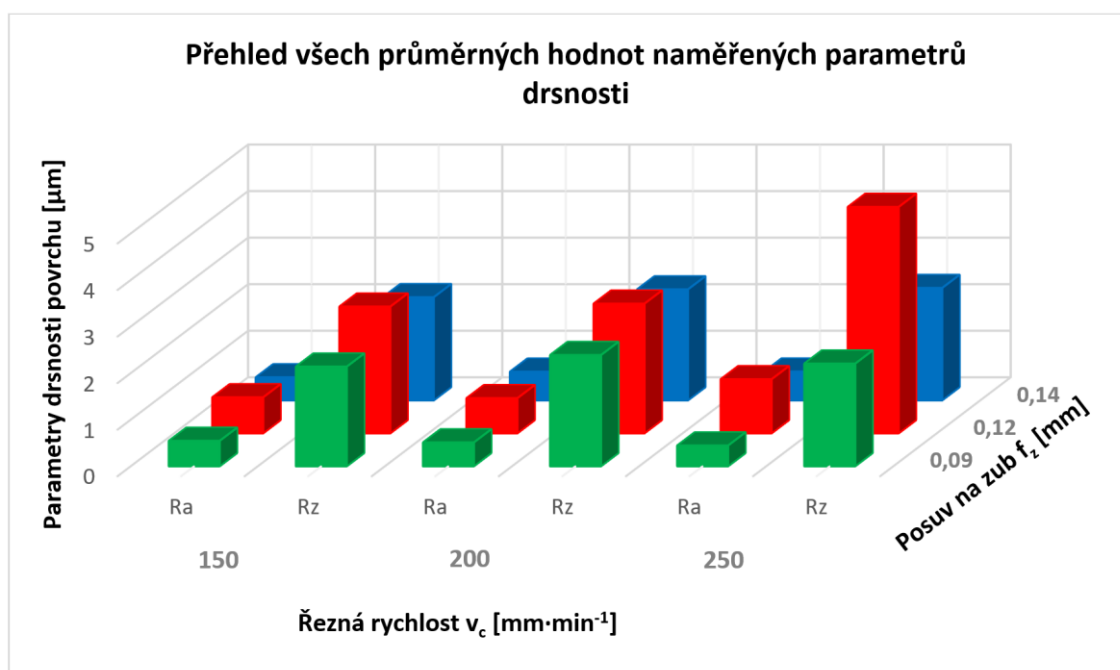


Obrázek 51 – Závislost parametru R_z na řezné rychlosti v_c

Dle grafů bylo nejnižšího parametru drsnosti R_a dosaženo při nejvyšší testované řezné rychlosti $v_c = 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a nejnižšího parametru drsnosti R_z při nejnižší testované řezné rychlosti $v_c = 150 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. U řezné rychlosti $v_c = 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ jsou také vidět nejvyšší rozdíly mezi parametry R_a a R_z při různých posuvech, zejména v případě nárůstu těchto parametrů u rychlosti posuvu $f_z = 0,12 \text{ mm}$. Lze říci, že řezná rychlost má vliv na výslednou drsnost obrobeného povrchu, ale vzhledem k různorodosti výsledků nelze předpokládat, zda snížení či zvýšení řezné rychlosti bude snižovat nebo zvyšovat parametry drsnosti R_a a R_z .

Tabulka 15 – Všechny průměrné hodnoty naměřených parametrů drsnosti povrchu

Řezná rychlost	$f_z = 0,09 \text{ mm}$		$f_z = 0,12 \text{ mm}$		$f_z = 0,14 \text{ mm}$	
	$R_a [\mu\text{m}]$	$R_z [\mu\text{m}]$	$R_a [\mu\text{m}]$	$R_z [\mu\text{m}]$	$R_a [\mu\text{m}]$	$R_z [\mu\text{m}]$
$v_c = 150 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	0,546	2,14	0,7732	2,7214	0,495	2,216
$v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	0,5124	2,3892	0,7546	2,7846	0,6154	2,3836
$v_c = 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	0,4458	2,2048	1,1614	4,863	0,6186	2,4144



Obrázek 52 – Všechny průměrné hodnoty naměřených parametrů drsnosti povrchu

Při celkovém srovnání naměřených hodnot můžeme vyhodnotit několik závěrů:

- Všechna měření měla u dílčích řezných rychlostí stejný průběh. Nejdříve docházelo se zvýšení drsnosti při zvýšení posuvu z $f_z = 0,09$ na $f_z = 0,12 \text{ mm}$ a k poklesu drsnosti při opětovném zvýšení posuvu na $f_z = 0,14 \text{ mm}$.

- U všech řezných rychlostí bylo dosaženo nejvyšší drsnosti při posuvu $f_z = 0,12$ mm. Dle teorie by mělo zvyšující se rychlosti posuvu docházet ke zvyšování drsnosti. V případě tohoto měření bylo však u nejvyšší rychlosti posuvu $f_z = 0,14$ mm dosaženo ve všech případech drsnosti výrazně nižší, než u $f_z = 0,12$ mm. Vzhledem k tomu, že tuto skutečnost potvrzují všechny naměřené výsledky při $f_z = 0,12$ mm, můžeme vyloučit náhodné vlivy jako chybu měřidla, lidskou chybu při měření apod. Použitý stroj byl pro tento druh frézování dostatečně tuhý, takže můžeme vyloučit jako příčinu nedostatečnou tuhost stroje. Lze předpokládat, že u rychlosti posuvu $f_z = 0,12$ mm docházelo k průhybu a vibracím nástroje nebo obrobku v důsledku dynamických složek řezných sil, které negativně ovlivnily výslednou drsnost obrobeného povrchu, a to u všech řezných rychlostí.
- U řezné rychlosti $v_c = 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ bylo dosaženo nejnižší R_a při posuvu $f_z = 0,09$ mm, tedy nejnižším posuvu. U řezné rychlosti $v_c = 150 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ tomu bylo naopak. Nejnižší R_a byla dosažena při nejvyšší rychlosti posuvu $f_z = 0,14$ mm. Avšak vzhledem k nejistotám měření a velmi malému rozdílu drsnosti mezi těmito naměřenými parametry lze předpokládat, že reálná drsnost byla nejnižší u posuvu $f_z = 0,09$ mm ve všech případech.
- Zcela nejnižší R_a bylo dosaženo při nejvyšší řezné rychlosti $v_c = 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a nejnižším posuvu $f_z = 0,09$ mm. Tato skutečnost potvrzuje dosavadní závěry studií, že se zvyšováním řezné rychlosti a snižováním rychlosti posuvu lze dosáhnout nižší drsnosti povrchu. Nelze však se tímto zjištěním řídit absolutně, jelikož vždy bude záležet na spoustě dalších vlivů na proces řezání jako jsou vibrace, opotřebení nástroje, tuhost stroje, upnutí obrobku atd. To také dokazují naměřené hodnoty v případě rychlosti posuvu $f_z = 0,12$ mm.

4 Závěr

V této bakalářské práci byla rozebrána problematika integrity povrchu po čelním frézování. Práce se zabývá jednotlivými vlastnostmi povrchu jako je jeho tvrdost, deformační zpevnění, zbytková napětí, mikrostruktura, a především drsnost, na kterou je zaměřena experimentální část.

V experimentální části byla jako zkoušený materiál použita korozivzdorná ocel 316L/1.4404. Zkušební vzorek byl frézován v laboratoři VŠB-TUO pomocí obráběcího centra MCV 1270 POWER od výrobce Kovosvit MAS. Použitým nástrojem byla čelní fréza od výrobce SANDVIK Coromant s pěti upnutými břitovými destičkami. Frézování bylo prováděno sousledně a bez použití procesních médií. Byly použity tři různé řezné rychlosti a tři různé posuvy. Hloubka záběru byla po celou dobu stejná.

Celkem bylo provedeno devět dílčích měření parametrů drsnosti povrchu. Každé měření bylo provedeno na povrchu frézovaného vzorku za jiných řezných podmínek. K měření parametrů drsnosti povrchu byl použit dílenský přístroj na měření povrchu HOMMEL-ETAMIC W5. Každé měření bylo provedeno ve směru kolmém na směr posuvu 5krát za sebou. Po naměření hodnot byly vypočteny aritmetické průměry z celého měření a také jeho nejistoty. Naměřené a vypočtené hodnoty byly zpracovány do formy tabulek pro co největší přehlednost.

Hodnoty z tabulek byly pro vyhodnocení přeneseny do grafů, a to nejdříve pro jednotlivé řezné rychlosti a pak do souhrnného grafu pro celkové porovnání a závěrečné vyhodnocení. Z výsledků je patrné, že drsnost povrchu se při stejné změně posuvu mění stejným způsobem bez ohledu na řeznou rychlost. Dalším důležitým poznatkem vyplývajícím ze souhrnného grafu je to, že celkově nejnižší drsnosti bylo dosaženo při nejvyšší řezné rychlosti a nejnižším posuvu.

Pojem integrity povrchu zahrnuje velmi širokou oblast, jejíž další studium a rozvoj v praxi je velmi důležitý. Zlepšování a vývoj technologie pro zlepšování drsnosti povrchu je také důležitý pro zvyšování kvality a životnosti součástí a systémů.

Poděkování:

Děkuji tímto své vedoucí bakalářské práce doc. Ing. et Ing. Mgr. Janě Petrů, Ph.D za ochotu, odborné vedení, cenné rady a veškerou pomoc při tvorbě této bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat technickým pracovníkům Romanu Pekarčíkovi a Petru Gufrovičovi, kteří mi pomohli s měřením hodnot během experimentu.

5 Použitá literatura

- [1] KŘÍŽ, Antonín. Integrita povrchu obrobku. In: *Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Oddělení povrchového inženýrství* [online]. 2014, s. 64 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/profesor_1.pdf
- [2] BUMBÁLEK, Bohumil. Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci. *Kvalita a Geometrické specifikace produktů* [online]. Prosinec 2005 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf
- [3] HAVLÍK, Luboš. *Integrita povrchu při vystružování s využitím vystružovací hlavy MT3* [online]. Brno, 2012, 88 s. [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30308151.pdf>. Diplomová práce. VUT v Brně
- [4] BULAWA, Pavel. *Hodnocení parametrů integrity povrchu po aplikaci vysokorychlostního frézování* [online]. Ostrava, 2018, 100 s. [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/129405/BUL0036_FS_N2301_2303T002_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava
- [5] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění: učební text* [online]. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2011, 143 s. [cit. 2020-03-28]. ISBN 978–80–248–2533–5. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_komplet_finish.pdf
- [6] *Řezné podmínky při obrábění: podklad pro výuku předmětu TECHNOLOGIE III – OBRÁBĚNÍ* [online]. Katedra obrábění a montáže, TU v Liberci, s. 6 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: http://www.kom.tul.cz/soubory/tob_rp.pdf
- [7] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-7080-568-4.
- [8] RÁZEK, Vítězslav. *Řezný proces a parametry povrchu při obrábění slitin titanu* [online]. Praha, 2017, 130 s. [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73360/F2-DP-2017-Smola-Jiri-Diplomova_prace_Smola.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. ČVUT v Praze
- [9] ADAMEC, Antonín a Martin KRBEC. *Strojírenství: Teorie obrábění* [online]. Mohelnice: Střední škola technická a zemědělská [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1193>

- [10] ŠINDELÁŘ, Jan. *Integrita povrchu po soustružení austenitických a duplexních ocelí* [online]. Liberec, 2016, 99 s. [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/20636/%25C5%25A0indel%25C3%25A1%25C5%2599%2bJan%2bDP%2b2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [11] *Strojárska metrológia a kvalita povrchov vytvorených technológiami obrábania* [online]. Žilina: ŽU v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra obrábania a výrobnéj techniky, 2014, s. 115 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/064/docs/metrologie.pdf>
- [12] P.V., Kandil, Lord J. D., Fry A. T. a Grant P. V. *A review of residual stress measurement methods- a guide to technical selection* [online]. 2001, s. 46 [cit. 2020-03-29]. ISSN 1473-273. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/236860729_A_review_of_residual_stress_measurement_methods--a_guide_to_technical_selection
- [13] KŘÍŽ, Antonín. *Vliv povrchu na užité vlastnosti výrobku* [online]. Plzeň: ZČU Plzeň, s. 12 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/kriz_prispevek_technologie_2011.pdf
- [14] BRAJER, Jan. *Vliv metody laser shock processing na integritu povrchu* [online]. Praha, 2018, 165 s. [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/79047>. Disertační práce. ČVUT v Praze
- [15] ŠPERKA, Petr. *Struktura povrchů vybraných strojních součástí* [online]. 2009, s. 27 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/10442189-Struktura-povrchu-vybranych-strojnich-soucasti.html>
- [16] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie: část 1* [online]. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004, s. 110 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <http://books.fs.vsb.cz/strojmetro/strojirenska-metrologie.pdf>
- [17] PECHÁČEK, Martin. *Hodnocení kvality povrchu při řezání u technologie AWJ a WJM* [online]. Brno, 2010 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=30527. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [18] HÝBL, Pavel. *Drsnost povrchu při frézování nakloněným nástrojem* [online]. Ostrava, 2010 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/81260/HYB028_FS_N2301_2303T002_2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava.

- [19] ČEP, Robert, Adam JANÁSEK, Jana PETRŮ, Marek SADILEK, Petr MOHYLA, Jan VALÍČEK, Marta HARNIČÁROVÁ a Andrej CZÁN. *Surface Roughness after Machining and Influence of Feed Rate on Process*. Key Engineering Materials [online]. 2013, 341-347 [cit. 2020-04-27]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.581.341. ISSN 1662-9795. Dostupné z: <https://www.scientific.net/KEM.581.341>
- [20] HERNÁNDEZ, Gonzáles, Luis WILFREDO, Roberto PÉREZ-RODRÍGUEZ, Ana María QUESADA-ESTRADA a Luminita DUMITRESCU. *Effects of cutting parameters on surface roughness and hardness in milling of AISI 304 steel* [online]. 2018, 57-63 [cit. 2020-04-27]. DOI: 10.15446/dyna.v85n205.64798. ISSN 2346-2183. Dostupné z: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/64798>
- [21] OOSTHUIZEN, Tiaan, Keshav NUNCO, Pieter CONRADIE a Dimitri DIMITROV. *The effect of cutting parameters on surface integrity in milling*. South African Journal of Industrial Engineering [online]. 2016, [cit. 2020-04-27]. DOI: 10.7166/27-4-1199. ISSN 2224-7890. Dostupné z: <http://sajie.journals.ac.za/pub/article/view/1199>
- [22] MAUROTTO, A., D. TSIVOULAS, Y. GU a M.G. BURKE. *Effects of machining abuse on the surface properties of AISI 316L stainless steel*. International Journal of Pressure Vessels and Piping [online]. 2017, 151, 35-44 [cit. 2020-04-27]. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2017.02.004. ISSN 0308-0161. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308016116302575>
- [23] POLMA, Mailis, Tonu LEEMET a Marten MADISSOO. *Study of surface integrity based on milling of material AISI 316L* [online]. 2019, [cit. 2020-04-27]. DOI: 10.22616/ERDev2019.18.N498. Dostupné z: <http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2019/Papers/N498.pdf>
- [24] RINO, Andias, R. IBRAHIM, C. Y. LONG, C. Y. NG, N. HAKIM, M. S. MUSTAPA. *Experimental Study on the Degree of Surface Generation by Edge Preparation Tools in Milling 316L*. International Journal of Engineering & Technology [online]. 2019, 80-88 [cit. 2020-04-27]. DOI: 10.14419/ijet.v8i1.1.24784. Dostupné z: <https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/24784>
- [25] NEREZOVÁ OCEL 1.4404 [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14404.html>
- [26] *Legovaná ušlechtilá ocel, austenitická s velmi nízkým obsahem uhlíku* [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <http://www.ak1324.cz/jakost-1-4404/>
- [27] *Korozivzdorná ocel – nerez* [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <http://www.alfun.cz/produkty/nerez/korozivzdorna-ocel-nerez>

- [28] *MCV 1270* [online]. [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/mcv-1270-p9.html>
- [29] *Čelní fréza pro frézování do rohu CoroMill® 390* [online]. [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/products/Pages/productdetails.aspx?c=r390-063q22-17m>
- [30] *Břítové destičky CoroMill® 390 pro frézování* [online]. [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/productdetails.aspx?c=r390-17%2004%2008mm%202040>
- [31] *SADÍLEK, Marek a Jaroslav DUBSKÝ. Obrábění I: výběr přednášek*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2015. ISBN 978-80-248-3857-1.
- [32] *HOMMEL-ETAMIC W5* [online]. [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: https://www.jenoptik.cz/files/173_14-hommel-katalog.pdf
- [33] *Měření drsnosti* [online]. [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1571>
- [34] *Vylučování extrémních hodnot souboru* [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn2/extremy.htm#Grubbs>